Modellering en Emulatie van Kleine Windturbines

Jan Van de Vyver

Promotor: prof. Lieven Vandevelde Begeleiders: Jeroen De Kooning, Bart Meersman

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van Master in de ingenieurswetenschappen: werktuigkunde-elektrotechniek

Vakgroep Elektrische energie, Systemen en Automatisering Voorzitter: prof. dr. ir. Jan Melkebeek Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur Academiejaar 2011-2012



Modellering en Emulatie van Kleine Windturbines

Jan Van de Vyver

Promotor: prof. Lieven Vandevelde Begeleiders: Jeroen De Kooning, Bart Meersman

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van Master in de ingenieurswetenschappen: werktuigkunde-elektrotechniek

Vakgroep Elektrische energie, Systemen en Automatisering Voorzitter: prof. dr. ir. Jan Melkebeek Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur Academiejaar 2011-2012



Dankwoord

Graag wil ik iedereen bedanken die geholpen heeft bij het realiseren van dit eindwerk.

In de eerste plaats wil ik mijn begeleiders ir. Jeroen De Kooning en dr. ir. Bart Meersman bedanken. Jeroen stond altijd klaar om vragen te beantwoorden en gaf heel wat nuttige aanwijzingen. Hij zorgde er bovendien voor dat de testopstelling op tijd kon gemonteerd worden. Zijn enthousiasme was een extra stimulans om van dit eindwerk iets moois te maken. Bart gaf goede opmerkingen voor het verbeteren van mijn tekst, waarvoor dank. Mijn promotor Prof. dr. ir. Lieven Vandevelde wil ik bedanken voor de kennis die hij mij de voorbije jaren heeft bijgebracht. Hij gaf me de mogelijkheid om dit eindwerk te maken en mee te gaan op conferentie.

Verder wil ik ook dr. ir. Frederik De Belie bedanken voor de tips bij het opmeten van de generatorparameters. Zijn duidelijke uitleg maakte dit heel wat makkelijker. Mijn dank gaat ook uit naar ir. Tine Vandoorn voor het nalezen van mijn conferentiepaper. Tony Boone en Stefaan Dhondt wens ik te bedanken voor de hulp bij het bouwen van de emulatoropstelling. Zonder hen was dit onmogelijk geweest. Mijn medestudenten Jeroen De Backer en Pieterjan Goedertier wil ik bedanken voor de goede sfeer in het labo. De vele babbels (al dan niet over onze thesis) waren altijd meer dan welkom.

Tot slot wil ik ook mijn familie bedanken. Mijn ouders hebben me vijf jaar lang gesteund, wat erg gewaardeerd wordt. Mijn broer Thijs wil ik bedanken om voor de nodige ontspanning tussendoor te zorgen.

Jan Van de Vyver 28 mei 2012

Toelating tot bruikleen

De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron nadrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.

de auteur

Jan Van de Vyver

Overzicht

Modellering en emulatie van kleine windturbines

Jan Van de Vyver

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van Master in de ingenieurswetenschappen: werktuigkunde-elektrotechniek

Promotor: prof. dr. ir. Lieven Vandevelde Begeleiders: ir. Jeroen De Kooning, dr. ir. Bart Meersman

Vakgroep Elektrische energie, systemen en automatisering Voorzitter: prof. dr. ir. Jan Melkebeek Faculteit Ingenieurswetenschappen Academiejaar 2011-2012

Het doel van deze scriptie is het opstellen van een model voor kleine windturbines en de implementatie ervan in simulatiesoftware en op een emulatoropstelling.

Het toegenomen gebruik van hernieuwbare energie, zoals windenergie, zorgt voor een groeiende interesse in kleine en middelgrote windturbines. Er zijn echter nog heel wat technologische verbeteringen mogelijk, o.a. wat betreft convertortopologie en de sturing van deze convertoren. Hierdoor kan het rendement van deze turbines nog sterk verhoogd worden. Om de rendementstoename van deze nieuwe technologieën aan te tonen, is experimentele verificatie vereist. Deze verificatie kan zowel in software als op een labo-opstelling gebeuren. Daarom is het van belang om een correct windturbinemodel op te stellen. De verschillende onderdelen van dit model worden in dit werk onderzocht voor kleine windturbines. Vervolgens worden ze in Matlab/Simulink geïmplementeerd.

Daarnaast wordt er een emulatoropstelling gebouwd die een echte windturbine nabootst. Hiervoor wordt een motor met geschikte sturing gebruikt, die de windturbine simuleert. De emulator vormt een handig instrument om het gedrag van nieuwe technologieën te verifiëren. Om een correct functionerende emulator te verkrijgen wordt ook de traagheid van de turbinerotor nagebootst en het verlies in de tandwielkast gecompenseerd. Beide zaken worden in dit eindwerk gemodelleerd en op de emulator uitgetest.

Tot slot wordt de correcte werking van het simulatiemodel en de emulator geverifieerd. Een goede overeenkomst tussen simulaties en experimentele metingen geeft aan dat de emulator correct een kleine windturbine emuleert.

Trefwoorden:

kleine windturbines, windturbine
model, windturbine-emulator, inertie
compensatie, tandwiel-kast
compensatie

Modeling and Emulation of Small Wind Turbines

Jan Van de Vyver

Supervisor(s): Prof. dr. ir. Lieven Vandevelde, ir. Jeroen De Kooning, dr. ir. Bart Meersman

Abstract—In this thesis, the modeling and emulation of small wind turbines is studied. Small wind turbines can play a role in future electricity generation, but the efficiency is still rather low. The efficiency of these installations may be further increased by performing additional research. To make this possible, an accurate model of the wind turbine is necessary. The model can then be implemented on an emulator that imitates a small wind turbine. The emulator makes it easier to study the behavior of a wind turbine and design new control mechanisms for the inverter, which connects the turbine to the grid. The way of modeling a wind turbine and implementing the model on a lab-scale emulator is described here.

 $Keywords{--}{\rm small}$ wind turbines, wind turbine emulator, inertia compensation, gearbox compensation

I. INTRODUCTION

Global environmental concerns have led to the increased use of renewable energy sources such as wind turbines. Most of these wind turbines have a rated power above 300 kW, but the interest in small wind turbines is growing steadily. As they are relatively small, with a rated power between 1 kW and 30 kW, they are suitable to be built in industrial, rural and even urban areas. For small wind turbines, the efficiency of energy conversion is generally lower than those of large wind turbines. To solve this problem, additional research is required. Therefore, the development of an accurate model for small wind turbines is very important. The model can be used to investigate the influence of wind turbines on the grid when there is a disturbance. On the other hand it is very useful to test new inverter topologies and algorithms. Implementing the model on a lab-scale emulator will avoid the need for a wind tunnel when performing these tests. The emulator consists of a motor with appropriate control, which imitates the turbine, so it can be easily placed in a lab. By changing the motor control, effects such as tower shadow and wind shear can be added or omitted. Therefore, it becomes easier to estimate the influence of these effects.

In this work, the modeling of wind turbines is studied and implemented on an emulator. The main goal is to obtain a properly functioning emulator, which can be used to investigate the behavior of small wind turbines.

II. WIND TURBINE MODELING

A. Wind Turbines

A commonly used wind turbine topology [1] is shown in Fig. 1. The turbine rotor is sometimes connected to a gearbox, which increases the shaft speed. Recently, topologies without gearbox are becoming more and more popular [2]. Nowadays, almost all wind turbines operate at a variable shaft speed to increase the energy yield. Variable speed operation can be obtained by connecting the generator to the grid by the means of a power converter. This converter injects the power produced by the generator in the grid.



Fig. 2. Modeling of a wind turbine: sub-models.

B. Structure of the model

When studying wind turbines without gearbox, the model can be divided into a number of sub-models [3]:

• a wind model which simulates the wind speed.

• a turbine model to represent the conversion between kinetic power in the wind to shaft power.

• a generator, inverter and grid model responsible for the conversion of shaft power to electrical power injected in the grid.

In this work, the inverter and grid model are replaced by the model of a variable resistance, as can be seen in Fig. 2.

III. WIND TURBINE EMULATOR

A. Overview

In Fig. 3, a schematic overview of the emulator is shown. The turbine is emulated by the asynchronous motor (c) and the gearbox (d). The torque delivered by the motor is controlled to simulate the torque delivered by the turbine blades in a real wind turbine. A power converter (a) is used to drive the motor. The power converter uses a analog voltage reference which represents the desired torque. This analog voltage is generated by a digital signal processor (DSP) by calculating the desired torque. To be able to calculate the reference torque, the shaft speed has to be known, for which an encoder (b) is used. The permanent synchronous generator (f) is connected to the gearbox via a claw clutch (e). A variable resistance with a range between 0 Ω and 1000 Ω is used as load.

When operating the emulator, it is possible to change the wind speed in the DSP. Also, the resistance can be varied during operation. Varying these parameters will change either the turbine torque $T_{\rm t}$ or the generator torque $T_{\rm g}$ and thus affect the operating point of the wind turbine.



Fig. 3. Schematic overview of the emulator.



Fig. 1. Commonly used wind turbine topology with fully rated power converter.

B. Inertia and gearbox compensation

Two main problems have to be solved to build a properly functioning emulator:

- the motor inertia is much smaller than the turbine inertia.
- there is a torque difference across the gearbox due to friction.

At a constant shaft speed, it is sufficient to let the motor deliver only the turbine torque. If the shaft speed is changing due to variations in wind speed or load, the dynamic behavior of the motor and turbine is different, due to the lower motor inertia. A compensation torque $T_{\rm in}$ has to be delivered to cope with this difference [4].

In the emulator, there are some friction losses. The major part can be found in the gearbox. When the motor delivers a certain torque, the generator will receive a lower torque due to a torque difference across the gearbox. This effect can be compensated by adding a gearbox compensation torque $T_{\rm gear}$. A model for the compensation torque is developed in this thesis.

C. Measurements

To verify the emulator, several measurements are carried out. Most important are the electrical power $P_{\rm e}$ and the shaft speed $\omega_{\rm m}$, which are measured at two different loads by varying the resistance. Meanwhile, the wind speed v is changed to obtain different working points. The electrical power and shaft speed are plotted in function of the wind speed in Fig. 4. The good cor-



Fig. 4. Shaft speed ω_m and electrical power P_e at different loads. X = experimental, O = simulation.

respondence between experimental and simulation results indicates that the emulator functions properly. The measurements in Fig. 4 are static measurements, as they are carried out at constant shaft speed, when a stable working point is already obtained. These results show that the gearbox compensation behaves correctly. To verify the proper functioning of the inertia compensation, dynamic measurements of the shaft speed are shown in Fig. 5. The results are satisfying, since the deviation between simulation and experimental values is very small. The small differences can be eliminated by further refining the gearbox model and inertia compensation.



Fig. 5. Dynamic behavior in case of a sudden increase in resistance from 300Ω to 1000Ω at a wind speed of 6 m/s. - - = experimental, — = simulation.

IV. CONCLUSIONS

The modeling of small wind turbines is investigated and implemented on a lab-scale emulator. To obtain a correct dynamic behavior, the inertia of the turbine is emulated. Also, a gearbox compensation method is proposed, to account for the influence of the gearbox. It is shown that the emulator functions properly, as demonstrated by the good agreement between the simulation and experimental results.

REFERENCES

- Z. Chen, J. M. Guerrero, and F. Blaabjerg, "A review of the state of the art of power electronics for wind turbines," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 8, pp. 1859–1875, 2009.
- [2] H. Polinder, "Overview of and trends in wind turbine generator systems," *Power and Energy Society General Meeting*, 2011 IEEE, pp. 1–8, 2011.
- [3] J. G. Slootweg, S. W. H. de Haan, H. Polinder, and W. L. Kling, "General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 144–151, 2003.
- [4] B. Neammanee, S. Sirisumrannukul, and S. Chatratana, "Development of a wind turbine simulator for wind generator testing," *International Energy Journal*, vol. 8, pp. 21–28, 2007.

Inhoudsopgave

1	Inle	iding	1
	1.1	Algemeen	1
	1.2	Overzicht	2
2	Wir	ndturbines	4
	2.1	Werking	4
	2.2	Windturbinetypes	5
		2.2.1 Vaste snelheid windturbines	6
		2.2.2 Inductiegenerator met gewikkelde rotor en dynamische slipcontrole	7
		2.2.3 Dubbelgevoede inductiegenerator	7
		2.2.4 Windturbines met omvormers voor het volledige vermogen	8
		2.2.5 Trends	9
	2.3	Windmolenparken	0
	2.4	Compensatieschakelingen 1	1
3	Mo	del van een windturbine 1	3
Ŭ	3.1	Algemeen 1	3
	3.2	Windmodel	4
	0	3.2.1 Model op basis van de gemiddelde windsnelheid	4
		3.2.2 Model op basis van het Van der Hoven spectrum	9
		3.2.3 Model op basis van het von Karman spectrum	20
		3.2.4 Gecombineerd model: Van der Hoven en von Karman	22
		3.2.5 Windschering en torenschaduw	22
	3.3		23
		3.3.1 Algemene beschrijving van de turbine	24
		3.3.2 De vermogenscoëfficiënt $C_{\rm p}(\lambda,\theta)$	25
		3.3.3 Inertie van de turbine	26
		3.3.4 Invloed van windschering en torenschaduw	27
		3.3.5 Aerodynamische filters	31
	3.4	Overige Modellen	33
		3.4.1 Transmissiekastmodel	33
		3.4.2 Generatormodel	33
		3.4.3 Convertormodel	34
		3.4.4 Model van het net	34
4	Sim	ulatiemodel in Matlab/Simulink	5
-	4.1	Algemeen	35
	4.2	Windmodel	36
		4.2.1 Keuze van het windmodel	36

		4.2.2	Implementatie in Simulink
		4.2.3	Windmodel in Matlab
		4.2.4	Windtypes
	4.3	Turbin	nemodel \ldots \ldots \ldots \ldots 44
		4.3.1	Keuze van het turbinemodel
		4.3.2	Ontwerp van de turbinerotor
		4.3.3	Implementatie in Simulink
		4.3.4	Turbinetypes
	4.4	Gener	$\operatorname{atormodel}^{\circ}$
		4.4.1	Algemeen
		4.4.2	Implementatie in Simulink
		4.4.3	Bepaling van de generatorparameters
	4.5	Lastm	$odel \dots \dots$
		4.5.1	Eenvoudig lastmodel
		4.5.2	Last model met regeling van λ
	4.6	Verific	atie
	1.0	4.6.1	Doorlopen van de $C_{\rm p}(\lambda)$ -curve
		4.6.2	Controle van het ingestelde werkingspunt 61
		4.6.3	Illustratie van torenschaduw en windschering 66
		464	Besluit.
		1.0.1	
5	Wir	ndturb	ine-emulator 68
	5.1	Algem	$een \ldots $
	5.2	Exper	imentele opstelling
		5.2.1	Emuleren van de turbine-inertie
		5.2.2	Compensatie van de tandwielkast
		5.2.3	Inductiemotor en tandwielkast
		5.2.4	Vermogenomvormer
		5.2.5	$DSP + versterkerschakeling \dots 73$
		5.2.6	Absolute encoder
		5.2.7	Generator
		5.2.8	Variabele last
	5.3	DSP-s	turing en opstart
		5.3.1	DSP-sturing
		5.3.2	Opstart
	5.4	Verific	ratie
	0.1	5.4.1	Instelling van het werkingspunt: statisch gedrag
		5.4.2	Instelling van het werkingspunt: dynamisch gedrag 81
		543	Verificatie van torenschaduw en windschering
		5.4.4	Besluit 87
		0.1.1	
6	\mathbf{Sim}	ulatie-	en experimentele resultaten 91
	6.1	Aanpa	assingen in het simulatiemodel
		6.1.1	Frequentieafhankelijkheid van de flux van de permanente magneten 91
		6.1.2	Frequentieafhankelijkheid van de statorweerstand en inductantie 92
		6.1.3	Simulaties met gewijzigde parameters
		6.1.4	Besluit
	6.2	Aanpa	assingen in de emulatoropstelling
		6.2.1	Het aangepast tandwielkastcompensatiekoppel

	6.2.2 Het aangepast inertiecompensatiekoppel	. 97				
	$6.2.3 \text{Besluit} \dots \dots$. 100				
	5.3 Flicker ten gevolge van torenschaduw en windschering	. 100				
	$6.3.1 \text{Algemeen} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $. 100				
	6.3.2 Vermogenfluctuaties bij een constante windsnelheid	. 100				
	0.3.3 Besluit	. 103				
7	Slotbeschouwingen en verder onderzoek	104				
	7.1 Besluiten	. 104				
,	7.2 Mogelijkheden voor verder onderzoek	. 106				
	7.2.1 Maximum power point tracking van kleine windturbines	. 106				
	7.2.2 Uitbreiding van het windturbinemodel en de emulator	. 106				
Bij	lagen	108				
A	Matlabscripts van de windmodellen	108				
	A.1 Zwakke, licht variërende wind	. 108				
	A.2 Matige, turbulente wind	. 109				
	A.3 Krachtige wind met hevige fluctuaties	. 110				
	A.4 Storm	. 112				
в	Versterkerschakeling	114				
	B.1 Filter 1	. 114				
	B.2 Filter 2	. 115				
	B.3 Niet-inverterende versterker	. 116				
	B.4 Simulatie in PSpice	. 117				
	B.5 Controlemeting	. 117				
\mathbf{C}	Communicatie tussen de encoder en de DSP					
	C.1 Probleemstelling	. 119				
	$C.2 SSI \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $. 119				
	C.3 Gray code	. 121				
	C.4 Communicatie in de opstelling	. 121				
D	DSP-code	124				
\mathbf{E}	Generatorparameters bij stroomverdringing	131				
Bib	Bibliografie 1					

Lijst van afkortingen

AC	Wisselspanning
DC	Gelijkspanning
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
DSP	Digital Signal Processor
EMI	Electromagnetic Interference
HVDC	High Voltage DC
IM	Inductiemachine
LSB	Least Significant Bit
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MSB	Most Significant Bit
PI	Proportioneel Integrerend
PMSG	Permanent magneet synchrone generator
PSD	Power Spectral Density
PWM	Pulse Width Modulation
\mathbf{SM}	Synchrone machine
SSI	Synchronous Serial Interface
STATCOM	Static Synchronous Compensator
VSC	Voltage Source Converter

Hoofdstuk 1

Inleiding

1.1 Algemeen

De wereldwijde bezorgdheid om het milieu heeft geleid tot een toegenomen gebruik van hernieuwbare energiebronnen zoals zonne-energie, windenergie, biomassa, enz.. Het grote voordeel van deze hernieuwbare energiebronnen is dat ze heel wat minder vervuilende stoffen uitstoten en onuitputbaar zijn. Als nadeel valt te vermelden dat ze vaak afhankelijk zijn van het weer: als er geen wind is, draaien de windmolens niet, is er weinig zon, dan leveren zonnepanelen weinig elektriciteit. Dit grillig karakter vormt een grote uitdaging voor de distributienetbeheerders.

Eén manier om gebruik te maken van deze energie is het bouwen van windturbines. De laatste jaren is er dan ook een immense toename van het aantal windturbines waar te nemen. Door onderzoek en constante verbeteringen is men in staat om steeds grotere turbines te bouwen, die meer elektriciteit leveren. De turbines in de grote offshore windmolenparken hebben bijna allemaal een relatief hoog vermogen (> 1 MW) zoals ook de meeste turbines aan land. Met het toenemend aantal turbines ontstaan er ook heel wat bijkomende problemen. Momenteel worden windturbines meestal niet betrokken in de stabiliteitscontrole van het net: bij belangrijke verstoringen worden ze losgekoppeld van het net en nemen de grote klassieke en nucleaire centrales de controle over. Eens de fout opgelost is, koppelt men de turbines weer aan. Dat deze situatie gevaarlijk is, bleek op 4 november 2006 toen er een zeer grote storing was op het Europese elektriciteitsnet [1]. Meer dan 15 miljoen gezinnen zaten gedurende enkele uren zonder stroom. De directe oorzaak was een geplande uitschakeling van een hoogspanningslijn boven de rivier Ems om een schip te laten passeren. Dit leidde tot de overbelasting van verschillende lijnen die vervolgens door de beveiliging uitgeschakeld werden. Hierdoor viel het Europese net uiteen in drie gebieden waar de frequentie sterk verstoord was. Deze verstoring van de netfrequentie zorgde voor een automatische afschakeling van zeer veel windturbines. In het gebied met overfrequentie zorgde dit initieel voor een stabilisatie, in de gebieden met onderfrequentie werkte het destabiliserend. Bij het herstellen van de nominale netfrequentie kwamen de windturbines opnieuw in het toegelaten frequentiebereik en schakelden automatisch opnieuw in. Dit zorgde opnieuw voor problemen. Wanneer de penetratie van deze windturbines echter toeneemt, is zo'n situatie onaanvaardbaar. Windturbines zullen moeten bijdragen tot de controle van de spanning en de frequentie. Geavanceerde sturingen van de convertor tussen de generator en het net kunnen dit verwezenlijken. Tegenstanders van windturbines halen vaak nadelen aan zoals slagschaduw, landschapsvervuiling, geluidsoverlast en het doden van vogels. Veel van deze problemen kunnen voorkomen worden door een geschikte inplanting van de windturbines: op zee, langs de autosnelweg of in industriezones.

Naast de turbines van hoog vermogen die overal opduiken, is er ook een groeiende interesse in kleine windturbines. Eén zo'n turbine heeft slechts een geringe invloed op de energieproductie, maar veel van deze turbines kunnen instaan voor een belangrijk deel van de hernieuwbare energieproductie. De efficiëntie van deze kleine windturbines is in veel gevallen echter heel wat lager dan van de grote tegenhangers. Er is dus nog heel wat ruimte voor verbeteringen en bijkomend onderzoek is bijgevolg gewenst. Het is zeer waarschijnlijk dat er in de nabije toekomst kleine windturbines (en microturbines) in stedelijke gebieden zullen verschijnen.

Het ontwikkelen van een nauwkeurig model voor de verschillende soorten windturbines is dan ook van zeer groot belang. Enerzijds kan het model gebruikt worden in de huidige netsimulatieprogramma's om de invloed van de turbine op het net te onderzoeken bij het optreden van storingen. Het is hierbij een vereiste dat het model tegelijk voldoende snel en nauwkeurig is. Anderzijds kan men nieuwe convertortopologieën en sturingen eerst simuleren en optimaliseren vooraleer ze op een machine te gebruiken. Hiernaast is ook het bouwen van een emulator van zeer groot belang om op een werkelijke machine testen uit te voeren. Een emulator maakt het mogelijk om testen uit te voeren zonder dat men de turbine in de wind moet plaatsen. De turbine wordt vervangen door een motor met de geschikte sturing die de wind simuleert. Hierdoor kan de testopstelling probleemloos in een onderzoekslokaal worden geplaatst. Het alternatief voor de emulator is het gebruik van een windtunnel. Hierbij plaatst men de turbine (in het geval van kleine turbines) of een schaalmodel ervan (bij grote windturbines) in een windtunnel. Zo kan het gedrag van de turbine worden nagegaan. De nadelen van deze aanpak worden snel duidelijk. Men dient over een windtunnel te beschikken, wat duur en plaatsrovend is. Om de invloed van de wanden van de windtunnel te beperken dient de tunnel immers voldoende groter te zijn dan de turbine of het schaalmodel. Een bijkomend voordeel van een emulator is de controleerbaarheid. Wanneer een turbine in de windtunnel wordt geplaatst, is het quasi onmogelijk om invloed van turbulentie, torenschaduw, e.d. uit te schakelen. Bij een emulator kan men deze effecten wel scheiden. Door wijzigingen aan te brengen in het model dat de motor aanstuurt, kan men ervoor kiezen om bepaalde effecten weg te laten of net extra in de verf te zetten. Het wordt hierdoor veel gemakkelijker om de invloed van bepaalde effecten in te schatten.

Het doel van deze thesis is het ontwikkelen van een model en emulator voor kleine windturbines. Zoals reeds vermeld is de interesse in kleine windturbines sterk aan het toenemen. Voor grote windturbines beschikt men reeds over nauwkeurige modellen en emulators, wat een goed uitgangspunt vormt voor deze thesis. Het simulatiemodel wordt geïmplementeerd in Matlab/-Simulink. De emulator zal uit een motor bestaan die de turbine nabootst. Deze motor drijft via een eventuele versnellingskast een synchrone generator aan zodat de volledige windturbine nagebootst wordt.

1.2 Overzicht

Dit hoofdstuk schetste kort het belang van een nauwkeurig windturbinemodel en een functionerende emulator voor kleine windturbines. Hierna volgt een overzicht van de verschillende hoofdstukken.

Hoofdstuk 2 beschrijft kort de werking van een windturbine. De meest voorkomende windturbinetypes worden besproken waarbij de nadruk wordt gelegd op de voor- en nadelen van de verschillende types. Aangezien de turbines vaak in windparken worden gegroepeerd, kunnen deze parken een aanzienlijk vermogen in het net injecteren. De windparken beschikken meestal over compensatieschakelingen om reactief vermogen te leveren en de netkwaliteit te verbeteren. De manier waarop de turbines met elkaar en met het net verbonden worden, is dus van zeer groot belang met betrekking tot netstabiliteit en netkwaliteit.

Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van het windturbinemodel, dat opgesplitst wordt in verschillende deelmodellen. Het windmodel laat toe om een realistisch verloop van de windsnelheid te simuleren. Vervolgens wordt het turbinemodel behandeld. Dit dient correct de omzetting van de energie vervat in de wind naar de energie beschikbaar op de as te modelleren. Het turbinemodel vormt het hart van het simulatiemodel en de emulator en zal in dit eindwerk dan ook gedetailleerd onderzocht worden. Tot slot wordt een kort overzicht gegeven van de modellen van de tandwielkast, de generator, de convertor en het net.

Hoofdstuk 4 behandelt de implementatie van het windturbinemodel in Matlab/Simulink. De praktische uitvoeringen van de verschillende modellen worden nader beschreven. De nadruk ligt op de keuze van de parameters van de turbinerotor, die zowel in het simulatiemodel als in de emulatoropstelling gebruikt worden. Het turbinemodel dient representatief te zijn voor een kleine windturbine. Het generatormodel wordt gebaseerd op de generator die in de testopstelling aanwezig is. Hiertoe worden de verschillende generatorparameters experimenteel opgemeten. Tot slot wordt de correcte werking van het simulatiemodel geverifieerd.

Hoofdstuk 5 beschrijft de opbouw en de werking van de windturbine-emulator. Eerst wordt wat dieper ingegaan op de problemen die zich stellen bij het bouwen van een emulator. Om correct overgangsverschijnselen te emuleren dient er een inertiecompensatiekoppel berekend te worden dat compenseert voor de lagere inertie van de inductiemotor in vergelijking met de werkelijke turbine-inertie. De aanwezigheid van een tandwielkast geeft aanleiding tot extra wrijvingsverliezen die ook gecompenseerd zullen worden. Vervolgens worden de onderdelen van de testopstelling besproken. Ter verificatie worden de meetresultaten op de emulator vergeleken met de simulatieresultaten.

In Hoofdstuk 6 wordt onderzocht welke wijzigingen in het simulatiemodel en de emulatoropstelling de afwijkingen tussen beide verder kunnen reduceren. Het simulatiemodel wordt ook aangewend om enkele realistische situaties te onderzoeken.

Hoofdstuk 7 vat de resultaten van de voorbije hoofdstukken samen. Er worden ook enkele mogelijkheden voor verder onderzoek gegeven.

Hoofdstuk 2

Windturbines

2.1 Werking

In onderstaande bespreking beperken we ons tot horizontale windturbines met drie turbinebladen. Door de specifieke vormgeving van de turbinebladen ontstaan er liftkrachten. Deze liftkrachten op de turbinerotor resulteren in een koppel zodat de turbine begint te draaien. De as van de rotor is met een generator verbonden, eventueel via een tandwielkast. Het is deze generator die elektriciteit opwekt. In veel gevallen is de generator via een elektrische omvormer met het net verbonden.

De meeste huidige turbines werken bij variabele rotorsnelheid om de energie vervat in de wind zoveel mogelijk te benutten. Beneden een bepaalde windsnelheid, de zogenaamde inschakelsnelheid (Engels: cut-in speed), wordt de windturbine stilgehouden [2]. Bij lage windsnelheden houdt de controlelus de rotorsnelheid constant op de minimum snelheid. Wanneer de windsnelheid voldoende hoog is, varieert de rotorsnelheid evenredig met de windsnelheid zodat de turbine zoveel mogelijk het maximaal beschikbare vermogen uit de wind benut. Daarvoor wordt gebruik gemaakt van een Maximum Power Point Tracking (MPPT) controle [3]. Bij hoge windsnelheden wordt de maximale rotorsnelheid bereikt. Deze snelheid wordt constant gehouden om schade door grote middelpuntvliedende krachten te vermijden. Bovendien zou langdurig bij een te hoge snelheid werken, resulteren in een te groot omgezet mechanisch vermogen. Dit kan de convertor beschadigen. Daarom beschikken windturbines over één van de volgende controlemechanismen om het vermogen te beperken [3]:

- **Passieve overtrekcontrole** (Engels: Passive stall control): de vorm van de turbinebladen is zodanig dat ze boven een bepaalde windsnelheid aan de tippen in overtrek (Engels: stall) gaan. Hoe hoger de windsnelheid, hoe verder de bladen overtrekken. Het gevolg van overtrek is dat er op de overtrokken gedeelten heel wat minder liftkracht is. Op deze manier wordt het vermogen beperkt.
- Stelhoekcontrole (Engels: Pitch control): de turbinebladen kunnen via een mechanisme gedraaid worden. Hierdoor verandert de aanvalshoek van de profielen en wordt de liftkracht en bijgevolg het vermogen beïnvloed. Als nadeel valt te vermelden dat snelle variaties in de windsnelheid moeilijk kunnen worden gecompenseerd aangezien de bladen slechts met een beperkte snelheid kunnen verdraaid worden.
- Actieve overtrekcontrole (Engels: Active stall control): deze techniek combineert de sterke punten van beide voorgaande systemen. De profielvorm is zodanig dat de turbinebladen overtrekken bij hoge windsnelheden. Hierdoor kunnen snelle variaties van de

windsnelheid worden opgevangen. Blijft de windsnelheid echter te hoog, dan grijpt de stelhoekcontrole in en worden de bladen verdraaid.

In Figuur 2.1 zijn de vermogencurves voor de verschillende systemen weergegeven [3]. Het is duidelijk dat het vermogen vloeiend kan worden beperkt door gebruik te maken van actieve overtrekcontrole of stelhoekcontrole. Bij passieve stelhoekcontrole valt het kleine doorschot op. Bovendien wordt bij hoge windsnelheden het overgedragen vermogen licht gereduceerd. Bij een te



Figuur 2.1: Vermogencurves voor: (a) Passieve overtrekcontrole, (b) Actieve overtrekcontrole, (c) Stelhoekcontrole.

hoge snelheid, de zogenaamde uitschakelsnelheid (Engels: cut-out speed) wordt de windturbine uit dienst genomen om beschadigingen te voorkomen. De turbine wordt uit de wind gedraaid om de krachten op de bladen, gondel en toren te beperken. Bovendien beschikken de turbines over een mechanische of hydraulische rem om de rotor te blokkeren zodat de turbine niet ongewenst begint te roteren. Bij kleine windturbines wordt er bovendien vaak gebruik gemaakt van een elektrische rem door de generator kort te sluiten.

2.2 Windturbinetypes

Er bestaan heel wat verschillende types van windturbines [3]. Een eerste belangrijk onderscheid dient gemaakt te worden tussen turbines met een horizontale en verticale as. Daarnaast wordt er ook een onderscheid gemaakt tussen turbines met een vaste of variabele snelheid. Voor het opwekken van elektriciteit worden hoofdzakelijk windturbines met een horizontale as gebruikt, vandaar dat we ons verder enkel tot dit type zullen beperken. Om elektriciteit te produceren wordt meestal gebruik gemaakt van inductiegeneratoren of synchrone generatoren.

Bij de inductiemachines is er een onderscheid tussen de machines met een kooi of deze met een gewikkelde rotor voorzien van sleepringen. Kooiankergeneratoren worden vaak gebruikt in vaste snelheid windturbines. Indien er voldoende demping aanwezig is in het systeem kunnen koppelpulsaties ten gevolge van windstoten makkelijker opgevangen worden. Voor het magnetiseren van de magnetische kring heeft een inductiegenerator nood aan blindvermogen. Dit kan worden geleverd door het net of door een condensatorbank dicht bij de generatorklemmen. Een inductiemachine met gewikkelde rotor beschikt over sleepringen. Hierdoor kunnen weerstanden of een vermogensomvormer op de rotorwikkeling worden aangesloten. Op deze manier kan werking bij een variërende snelheid worden bekomen wat resulteert in een hogere energieopbrengst en een lagere belasting van de turbine.

Synchrone machines kunnen dan weer worden opgedeeld in permanente magneet generatoren of extern geëxciteerde generatoren. Synchrone generatoren met veel polen kunnen worden aangewend zonder gebruik te maken van een versnellingskast, wat kosten en onderhoud spaart. Wordt de synchrone generator rechtstreeks (zonder versnellingskast) aangedreven door de turbine, dan is de mechanische demping van de aandrijflijn over het algemeen laag. Er dient dus altijd een vermogensomvormer voor het volledige vermogen te worden geïnstalleerd bij het gebruik van deze machines.

Hieronder wordt een kort overzicht gegeven van enkele veelgebruikte systemen.

2.2.1 Vaste snelheid windturbines

Deze topologie (zie Figuur 2.2) werd zeer veel gebruikt in de eerste windturbines [3]. Een kooianker inductiegenerator is via een transformator rechtstreeks met het net verbonden, het zogenaamde 'Deense concept' (Engels: Danish concept). De generator draait dus aan een quasi constante snelheid. Om elektriciteit aan het net te kunnen leveren dient de inductiegenerator dus aan een supersynchrone snelheid te draaien. Zoals reeds vermeld wordt er gebruik gemaakt van overtrekcontrole of stelhoekcontrole om het vermogen te beperken. Bij het aansluiten van de inductiegenerator op het net ontstaan er hoge inschakelstromen die verstoringen van het net en koppelfluctuaties tot gevolg hebben. Bijgevolg beperkt dit het aantal turbines dat op het net kan worden aangesloten om de stabiliteit niet in het gedrang te brengen. Deze hoge aanloopstromen kunnen sterk gereduceerd worden door gebruik te maken van *soft-starters*. Ze zijn voorzien van een kortsluitschakelaar om het volledige vermogen naar het net te transporteren eens de aanloop voltooid is. Bovendien helpen de *soft-starters* mee om piekstromen ten gevolge van windvlagen uit te dempen zodat de belasting op de volledige aandrijfas vermindert. Om de turbine van de nodige blindstroom te voorzien, worden ze vaak met condensatorbanken uitgerust. De grootste voordelen van het gebruik van een kooiankergenerator zijn de éénvoudige



Figuur 2.2: Vaste snelheid windturbine met kooiankergenerator en soft-starter.

constructie en de afwezigheid van een convertor. Dit resulteert in een lagere kost en dus een kortere terugverdientijd. Er zijn echter ook nadelen verbonden aan dit systeem. De turbine draait aan een quasi constante snelheid, wat de energieopbrengst vermindert. Bovendien kan het elektrisch vermogen van de generator niet snel worden aangepast, aangezien de enige stuurmogelijkheden actieve overtrekcontrole of stelhoekcontrole zijn [4]. Windstoten zorgen vaak voor hevige koppelpulsaties, wat zeer belastend is voor alle onderdelen op de aandrijfas. Hierdoor is er vaak een stevigere en duurdere constructie vereist van sommige onderdelen om deze grote mechanische spanningen te kunnen weerstaan. Tenslotte valt op te merken dat deze windturbines enkel kunnen worden aangesloten op een voldoende sterk net, zodat de frequentie constant kan worden beschouwd. Indien dit niet het geval is, kan de windturbine de netfrequentie beïnvloeden waardoor er stabiliteitsproblemen ontstaan.

2.2.2 Inductiegenerator met gewikkelde rotor en dynamische slipcontrole

In deze opstelling (zie Figuur 2.3) is de rotorwikkeling via sleepringen verbonden met variabele weerstanden [3]. Hoe hoger de weerstand in de rotorkring, hoe hoger de slip. De weerstandswijziging wordt via vermogenselektronische schakelaars tot stand gebracht. Op deze manier kan de rotorsnelheid over een beperkt bereik gevarieerd worden, waardoor de belasting op de verschillende onderdelen vermindert (minder koppelpulsaties). Net zoals de kooiankermotor uit de vorige paragraaf dient ook deze generator aan een supersynchrone snelheid te draaien om elektriciteit aan het net te kunnen leveren. Aangezien het werkingspunt gevarieerd kan worden, is de energieopbrengst hoger over een groter bereik van windsnelheden. Door aanpassing van de slip kan de machine ook aanlopen met minder hoge opstartstromen, al blijft een *soft-starter* noodzakelijk. Nadelig is echter de aanwezigheid van sleepringen met koolstofborstels die onderhoud vergen. Energetisch is deze topologie ook bijzonder ongunstig, omdat er in sommige gevallen bij hoge slip wordt gewerkt. Dit resulteert in hoge rotorverliezen in de variabele rotorweerstanden. De inductiegenerator heeft opnieuw nood aan blindstroom, die door compensatieschakelingen moet geleverd worden.



Figuur 2.3: Inductiegenerator met gewikkelde rotor en dynamische slipcontrole.

2.2.3 Dubbelgevoede inductiegenerator

Bij de windturbines met een dubbelgevoede inductiegenerator (Engels: Doubly Fed Induction Generator, DFIG)(zie Figuur 2.4) is de statorwikkeling van de generator rechtstreeks op het net aangesloten [3]. De rotorwikkeling is via sleepringen verbonden met een omvormer. Door de frequentie van de rotorstromen te regelen, kan de mechanische snelheid van de rotor variëren in een gebied van \pm 30% van de nominale snelheid. In tegenstelling tot de vorige twee topologieën kan de generator nu zowel bij supersynchrone als subsynchrone snelheden werken. In de praktijk zal de slip van de generator worden gevarieerd door het actief en reactief vermogen door de omvormer te controleren. Als vermogenomvormer wordt er meestal gebruik gemaakt van een rug-aan-rug convertor (Engels: back-to-back convertor), bestaande uit twee bidirectionele vermogensomvormers, de ene is verbonden met de rotorwikkeling via de sleepringen, de andere met het net. Ze delen een gemeenschappelijke DC-bus. De convertor produceert hoogfrequente

harmonischen door het PWM-schakelen, waardoor filters noodzakelijk worden om deze te reduceren. Het grote voordeel van dit type windturbine is dat de omvormer slechts voor een beperkt



Figuur 2.4: Dubbelgevoede inductiegenerator.

deel van het nominale vermogen $(\pm 30\%)$ moet gebouwd worden. Bovendien kan het actief en reactief vermogen geregeld worden, waardoor er geen compensatieschakelingen of *soft-starters* meer nodig zijn. Net zoals het type met dynamische slipcontrole is de energieopbrengst hoger over een groter bereik van windsnelheden door de variabele rotorsnelheid. Als nadeel valt de aanwezigheid van sleepringen en bijhorende koolstofborstels te vermelden omdat deze regelmatig onderhoud vergen. Daarenboven wordt de sturing van de convertor ook behoorlijk complex.

2.2.4 Windturbines met omvormers voor het volledige vermogen

Er kan gebruik gemaakt worden van kooianker inductiegeneratoren en synchrone generatoren door deze via een vermogensomvormer met het net te verbinden [3]. De windturbine kan dan op een willekeurige snelheid werken zodat de windenergie optimaal kan benut worden. De omvormer zal ervoor zorgen dat de generator aan de meest gunstige snelheid draait. Hierbij wordt de stelhoek van de turbinebladen op nul gehouden. Boven het nominale vermogen zal de stelhoekcontrole ingrijpen om het vermogen te beperken. Meestal wordt er gebruik gemaakt van een spanningsinvertor (Engels: Voltage source converter (VSC)) zodat het actief en reactief vermogen compleet gestuurd kan worden. De spanning afkomstig van de generator wordt door de eerste omvormer gelijkgericht en aan een gemeenschappelijke DC-bus geleverd. Daarna zet een tweede omvormer de gelijkspanning om naar de driefasige wisselspanning van het net. De voordelen van windturbines met een omvormer voor het volledige vermogen zijn duidelijk. De turbine werkt aan variabele snelheid wat de energie-opbrengst vergroot. Koppelpulsaties door windstoten kunnen nu naast de inertie van de draaiende onderdelen ook door de tussengeschakelde convertor worden opgevangen, waardoor de belasting op de aandrijfas afneemt. Bovendien kunnen actief en reactief vermogen apart geregeld worden, zodat de arbeidsfactor de gewenste waarde kan bereiken zonder de noodzaak aan compensatieschakelingen. Het nadeel is de aanwezigheid van een convertor voor het volledige vermogen. Deze is vaak duur en genereert hoogfrequente harmonischen die door filters moeten gereduceerd worden. Zoals te zien in Figuur 2.5 zijn er verschillende configuraties mogelijk. Men kan gebruik maken van een inductiegenerator met tandwielkast (a). Voor de synchrone generator met tandwielkast (b) is er een bijkomende kleine gelijkrichter vereist om de veld-excitatie te voeden. Als minpunt valt op te merken dat er een tandwielkast aanwezig is. Dit is een gevoelig onderdeel dat regelmatig onderhoud vergt. De veelpolige synchrone generator (c) kan het gebruik van een tandwielkast voorkomen. Recent is ook het gebruik van synchrone generatoren met permanente magneten (d) toegenomen.



Figuur 2.5: Windturbines met omvormers voor het volledige vermogen. (a) Inductiegenerator met tandwielkast. (b) Synchrone generator met tandwielkast. (c) Veelpolige synchrone generator. (d) Veelpolige synchrone generator met permanente magneten.

Natuurlijk is bovenstaande oplijsting niet volledig. Er bestaan nog heel wat varianten waar geen gebruik wordt gemaakt van tandwielkasten of waarbij er juist met meertrappige versnellingskasten wordt gewerkt.

2.2.5 Trends

Zoals de vorige paragrafen aangeven, zijn er heel wat verschillende types windturbines op de markt, met elk specifieke nadelen en voordelen. De keuze van het type turbine hangt dan ook van heel wat factoren af. Bepaalde types dienen aan land gebouwd te worden, terwijl andere modellen beter functioneren op zee. Ook wettelijke regelgeving, technische en economische overwegingen zullen van groot belang zijn bij deze keuze. Ondanks de grote verscheidenheid aan systemen, valt er toch een algemene trend op te merken [5]. De vaste snelheid turbines worden steeds minder gebouwd, net zoals de gewikkelde inductiegeneratoren met weerstandsregeling in de rotorkring. De dubbelgevoede inductiegeneratoren zaten tot voor kort sterk in de lift. Vooral tussen 1998 en 2008 werd dit type zeer vaak gebouwd [6]. De laatste jaren valt echter een sterke stijging van de turbines met volledige vermogenomvormer waar te nemen. De turbinetypes met een permanente magneet synchrone generator (PMSG) zitten hierbij sterk in de lift [6].

2.3 Windmolenparken

Vaak worden windturbines gebouwd in zogenaamde windmolenparken. Dergelijke parken leveren vaak een aanzienlijk vermogen aan het net en hebben dus een belangrijke invloed op de netstabiliteit en kwaliteit. Er worden hoge eisen gesteld met betrekking tot spannings- en frequentiecontrole. Om hieraan te voldoen spelen de vermogenomvormers een belangrijke rol. Er zijn dan heel wat mogelijke topologieën om de turbines met het net te verbinden. In Figuur 2.6 zijn drie mogelijke configuraties weergegeven [3]. Natuurlijk zijn er nog heel wat andere mogelijkheden. Elke turbine kan over een eigen omvormer beschikken die aangesloten is op



Figuur 2.6: Mogelijke configuraties voor windmolenparken. (a) Configuratie met gemeenschappelijk DC-net. (b) Configuratie met gemeenschappelijk AC-net. (c) Configuratie met aparte omvormer per windmolen.

een gemeenschappelijk DC-net (a). Op deze manier kan elke turbine in het park draaien aan de meest optimale snelheid, wat de energieopbrengst verhoogt. De omvormer naar het net is dan voor (een deel van) het park gemeenschappelijk. Daarentegen kan men ook opteren voor een gemeenschappelijk AC-net in het windmolenpark (b). Nu dienen alle turbines aan dezelfde snelheid te draaien. In tegenstelling tot de vorige configuratie, is het aantal omvormers nu wel beperkter. De gelijkrichter, DC-bus en omvormer naar het net zijn dan voor (een deel van) het windmolenpark gemeenschappelijk. Beide voorgaande systemen maken gebruik van een DC-net, wat zeer vaak voorkomt als het vermogen over een lange afstand moet worden getransporteerd, by, bij offshore installaties. Op zee wordt de driefasige wisselspanning van de generatoren via vermogenomvormers omgezet naar gelijkspanning (Engels: High voltage DC (HVDC)). Een omvormersstation aan land zet de gelijkspanning weer om naar wisselspanning. Het grote voordeel van HVDC is dat er (duur) kabelmateriaal wordt gespaard. Voor toepassingen op zee kan zelfs vaak de terugvoergeleider worden weggelaten, daar het zeewater als geleider fungeert [7]. Elke windturbine kan ook over een volledige omvormer beschikken die aangesloten is op het net (c). Dit laat heel nauwkeurige regeling van snelheid, vermogen, ... toe. Het aantal omvormers is wel hoog, wat de kosten de hoogte in jaagt.

2.4 Compensatieschakelingen

Zoals reeds aangehaald worden de eisen gesteld aan windturbines steeds strenger naargelang de penetratie toeneemt. In het ideale geval nemen windturbines deel aan frequentie- en spanningscontrole. Sommige van deze eisen kunnen worden vervuld door gebruik te maken van compensatieschakelingen. Windturbines die gebruik maken van inductiegeneratoren zijn verbruikers van reactief vermogen. Daarom voorziet men vaak compensatieschakelingen om dit reactief vermogen te leveren. Hierdoor nemen de jouleverliezen af en wordt de spanningsstabiliteit verhoogd. In Figuur 2.7 zijn enkele manieren te zien om de compensatieschakelingen uit te voeren.



Figuur 2.7: Compensatieschakelingen. (a) Mechanisch geschakelde condensatoren. (b) Elektronisch geschakelde spoelen en condensatoren. (c) STATCOM. (d) Schakelbare seriecondensatoren.

Er wordt meestal een onderscheid gemaakt tussen compensatie binnen het windmolenpark en deze erbuiten. Wanneer de afstand van het park tot het aansluitpunt op het net kort is, compenseert men meestal binnen het windmolenpark. Bij lange afstanden compenseert men vaak erbuiten.

Compensatie in het windmolenpark kan gebeuren met mechanisch geschakelde condensatorbanken (a). Het voordeel is de eenvoudige uitvoering. Nadelig zijn de grote spannings-transiënten bij het sluiten van de schakelaars en de slijtage van deze schakelaars door het veelvuldig openen en sluiten. Om deze problemen te verhelpen kan er gebruik gemaakt worden van elektronisch geschakelde spoelen en condensatoren, bv. met thyristoren als schakelaars (b). Geschakelde spoelen veroorzaken wel harmonischen in de stroom, terwijl geschakelde condensatoren spanningsharmonischen introduceren. Door een geschikte combinatie van beide (en eventueel ook van mechanisch geschakelde banken) kunnen echter zeer goede resultaten bekomen worden. Een derde mogelijkheid is het gebruik van STATCOM (c). Dit systeem is gebaseerd op een spanningsinvertor als bron van reactief vermogen. Het voordeel is dat het systeem zeer snel kan geregeld worden en minder storingen veroorzaakt. De spanningsinvertor kan zowel als bron van reactief vermogen (condensatorgedrag) als verbruiker van reactief vermogen (spoelgedrag) fungeren.

Door in de transmissielijn naar het net een schakelbare seriecondensator (d) aan te brengen, kan de reactantie van de lijn geregeld worden. Hierdoor kan de stabiliteit, de spanning en de arbeidsfactor verbeterd worden. Bovendien kan de overdracht van actief vermogen beïnvloed worden. Het vermogen dat door een lijn kan worden overgedragen wordt gegeven door de volgende formule:

$$P = \frac{U_{\rm n} \cdot U_{\rm w}}{X_{\rm L} - X_{\rm C}} \sin(\delta) \tag{2.1}$$

waarbij $U_{\rm n}$ de netspanning, $U_{\rm w}$ de spanning aan het windmolenpark, $X_{\rm L}$ de lijnreactantie, $X_{\rm C}$ de reactantie van de schakelbare condensator en δ de hoek tussen $U_{\rm n}$ en $U_{\rm w}$ is. Door de reactantie van de schakelbare condensator te veranderen kan dus het overdraagbaar vermogen beïnvloed worden.

Hoofdstuk 3 Model van een windturbine

3.1 Algemeen

Bij het modelleren van een windturbine wordt het model opgesplitst in een aantal subsystemen:



Figuur 3.1: Modelleren van windturbines.

- Windmodel: dit model dient een windsnelheidsignaal te genereren dat op de rotor kan aangelegd worden
- **Turbinemodel**: het turbinemodel dient het (kinetisch) vermogen dat in de wind vervat zit om te zetten in een mechanisch vermogen dat aan de transmissiekast aangeboden wordt
- **Transmissiekastmodel**: modelleert de transmissiekast die het inkomend mechanisch vermogen van de turbine omzet naar een mechanisch vermogen dat aan de generator wordt aangeboden
- Generatormodel: model van de generator dat het mechanisch vermogen omzet in een elektrisch vermogen
- **Convertormodel**: model van de convertor om het elektrisch vermogen afkomstig van de generator over te brengen naar het net

• Model van het net: model van het net om het gedrag van de turbine aangesloten op het net te simuleren

De verschillende deelmodellen zullen in dit hoofdstuk nader besproken worden.

3.2 Windmodel

Om een windturbine te kunnen simuleren is er vooreerst een windsnelheid nodig. Dit signaal kan een reeks zijn van meetdata die op het turbinemodel wordt aangelegd. Er kan echter ook een model worden gebouwd dat de windsnelheid zo nauwkeurig mogelijk simuleert. Er zijn verschillende mogelijkheden om de windsnelheid te simuleren. Hieronder volgen enkele vaak toegepaste methodes.

- Model op basis van de gemiddelde windsnelheid: dit is het meest eenvoudige windmodel. Het model is modulair opgebouwd, wat heel wat inzicht in de verschillende onderdelen toelaat. Ondanks de eenvoud levert het toch behoorlijke resultaten, het zal dan ook in dit eindwerk gebruikt worden.
- Model op basis van het Van der Hoven spectrum: dit model wordt algemeen aanvaard als één van de beste benaderingen van een werkelijk windsnelheidsverloop. De basis van het model is het Van der Hoven spectrum. Het nadeel is dat er in de literatuur niet onmiddellijk een gesloten formule voor dit spectrum beschikbaar is, wat het gebruik ervan bemoeilijkt.
- Model op basis van het von Karman spectrum: in het Van der Hoven model worden trage snelheidsvariaties goed gemodelleerd, maar de turbulentie is overal even groot, wat niet correct is. Het model dat gebruik maakt van het von Karman spectrum modelleert turbulentie wel juist, maar zorgt voor foute resultaten bij trage variaties.
- Gecombineerd model: Van der Hoven en von Karman: dit model combineert de goede eigenschappen van de twee voorgaande modellen: de traagvariërende component wordt bepaald uit het Van der Hoven spectrum, de turbulente component uit het von Karmon spectrum. Het model wordt hierdoor wel zeer gecompliceerd.

In de volgende paragrafen worden de verschillende modellen meer in detail besproken.

3.2.1 Model op basis van de gemiddelde windsnelheid

De basis van dit model is de **gemiddelde windsnelheid** ter hoogte van de gondel [2]. Deze gemiddelde windsnelheid is natuurlijk niet altijd gelijk, maar varieert doorheen de tijd. Uit metingen is gebleken dat de verdeling van de windsnelheid op een bepaalde plaats zeer goed kan benaderd worden door een Weibull distributie [8,9]. Typisch worden de meetdata van de windsnelheid op de gewenste locatie uitgezet in een histogram. Hieraan wordt dan een Weibull distributie gefit om de parameters c en k te bepalen. De gecummuleerde Weibull distributie heeft volgende vorm:

$$F(v) = \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \tag{3.1}$$

hierbij is F(v) de fractie van de tijd dat de gemiddelde windsnelheid v overschrijdt. De parameters in (3.1) zijn de vormparameter k en de schaalparameter c. De Weibull distributie f(v)wordt nu gegeven door:

$$f(v) = -\frac{\mathrm{d}F(v)}{\mathrm{d}v} = k\frac{v^{k-1}}{c^k}\exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]$$
(3.2)

waarbij k > 0, v > 0 en c > 1. Deze functie geeft voor elke windsnelheid de kans dat ze optreedt. Enkele typische distributiefuncties zijn te vinden in Figuur 3.2. Uit deze distributies blijkt dat lagere windsnelheden veel frequenter voorkomen dan hoge windsnelheden. De gemiddelde



Figuur 3.2: Weibull distributies.

windsnelheid is echter niet enkel afhankelijk van de plaats waar de turbine gebouwd wordt. Ze hangt ook af van de hoogte. Om een realistische simulatie van de windsnelheid te kunnen maken, is het dus van belang om de gemiddelde windsnelheid ter hoogte van de gondel te kennen. Deze gegevens zijn in de meeste gevallen niet rechtstreeks beschikbaar. Daarom wordt gebruik gemaakt van onderstaande wet die een benadering geeft voor de windsnelheid op verschillende hoogtes.

$$\frac{v(z_2)}{v(z_1)} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{\alpha} \tag{3.3}$$

 z_1 stelt hierbij de hoogte voor waar de windsnelheid gekend is (ongeveer 10 m), z_2 is de hoogte waarbij men de windsnelheid wil kennen. De factor α is empirisch vastgesteld voor verschillende omgevingen. Enkele typische waarden van α zijn te vinden in Tabel 3.1. De gemiddelde windsnelheid blijft echter niet toenemen zoals de formule (3.3) suggereert [8]. Vanaf een hoogte van ongeveer 450 m neemt de windsnelheid opnieuw af. Deze formule geeft een behoorlijk nauwkeurige voorspelling van de windsnelheid voor hoogtes die variëren tussen 10 m en 150 m. De waarde van α kan veranderen met de hoogte, het moment van de dag, het seizoen, het jaar, de aard van het terrein, de windsnelheiden en de temperatuur. Metingen over de hele wereld hebben aangetoond dat de gemiddelde waarde van α ongeveer 1/7 bedraagt. We beschikken nu over voldoende informatie om een waarde van de gemiddelde windsnelheid op gondelhoogte te bepalen. Deze gemiddelde windsnelheid is op te vatten als het gemiddelde over de tijdspanne van een jaar. Voor de tijdspannes die van belang zijn voor het windmodel kan deze snelheid

Terreintype	α
Meer, oceaan en gladde harde bodem	0,10
Lang gras op een vlakke ondergrond	0,15
Hoge gewassen, hagen en struiken	0,20
Bebost land met veel bomen	0,25
Klein dorp met wat bomen en struiken	0,30
Verstedelijkt gebied met hoge gebouwen	0,40

Tabel 3.1: Coëfficiënt α bij verschillende terreintypes.

dus als constant beschouwd worden. Bijgevolg wordt een horizontale rechte verkregen als de gemiddelde snelheid uitgezet wordt in functie van de tijd.

Naast de gemiddelde windsnelheid worden er in dit model **tijdsvariaties van de gemiddelde windsnelheid** beschouwd [2]. Gedurende een bepaalde tijd neemt de windsnelheid toe of af naar een andere waarde. De snelheid van deze variaties in windsnelheid is behoorlijk traag. Deze veranderingen in gemiddelde windsnelheid worden als volgt gekarakteriseerd:

- de amplitude van de toename in windsnelheid: $A_{\rm h}$ [m/s]
- het startmoment van de verandering in gemiddelde windsnelheid: $T_{\rm sh}$ [s]
- het eindmoment van de verandering in gemiddelde windsnelheid: $T_{\rm eh}$ [s]

In Figuur 3.3 wordt een voorbeeld gegeven van een snelheidsvariatie.



Figuur 3.3: Variatie van de gemiddelde windsnelheid. $A_{\rm h} = 3/40 \,\mathrm{m/s}, T_{\rm sh} = 40 \,\mathrm{s}$ en $T_{\rm eh} = 80 \,\mathrm{s}.$

Windvlagen zijn ook een veelvuldig voorkomend fenomeen [2]. Een voorbeeld van een windvlaag is te zien in Figuur 3.4. Windvlagen worden gemodelleerd gebruik makend van onderstaande vergelijkingen:

$$t < T_{\rm sv} : v_{\rm wv} = 0$$

$$T_{\rm sv} \le t \le T_{\rm ev} : v_{\rm wv} = A_{\rm v} [1 - \cos(2\pi (t/D_{\rm v} - T_{\rm sv}/D_{\rm v}))]$$

$$T_{\rm ev} < t : v_{\rm wv} = 0$$

(3.4)

hierbij geldt er:

• de amplitude van de windvlaag: $A_{\rm v}$ [m/s]



Figuur 3.4: Windvlaag. $A_{\rm v} = 3 \,{\rm m/s}, T_{\rm sv} = 40 \,{\rm s}$ en $T_{\rm ev} = 100 \,{\rm s}.$

- het startmoment van de windvlaag: T_{sv} [s]
- het eindmoment van de windvlaag: T_{ev} [s]
- de duur van de windvlaag: $D_{\rm v} = T_{\rm ev} T_{\rm sv}$ [s]

Ten slotte dient ook nog de **turbulentie** in rekening gebracht te worden [2]. Deze wordt gemodelleerd als een stationair proces. Dit betekent dat de intensiteit van de turbulentie onafhankelijk is van de ogenblikkelijke windsnelheid. De turbulentie is even intens bij lage als bij hoge windsnelheden. In werkelijkheid zal de turbulentie toenemen met toenemende windsnelheid. In dit eenvoudig model wordt de gemiddelde snelheid \bar{v} als basis genomen om de turbulentie te begroten. Aangezien \bar{v} constant is over de tijdspanne van interesse, is de turbulentie onafhankelijk van de ogenblikkelijke snelheid. Onderstaande spectrale vermogensdichtheid (Engels: Power Spectral Density (PSD)) wordt gebruikt om de turbulentie te modelleren. Het spectrum geeft aan hoeveel kinetische energie er in de turbulente termen vervat zit. Hoe hoger de waarde van S(f), hoe meer energie de wind bij deze frequentie bevat. De eenheid van S(f) is m²/s, dus na vermenigvuldiging met de frequentie f kan $f \cdot S(f)$ beschouwd worden als de kinetische energie per kilogram lucht vervat in de wind. S(f) heeft volgende uitdrukking:

$$S(f) = \frac{\frac{1}{\ln(z_2/z_0)^2} \cdot L \cdot \bar{v}}{\left(1+1, 5\frac{f \cdot L}{\bar{v}}\right)^{5/3}}$$
(3.5)

waarin:

- de frequentie van de turbulente component: f [Hz]
- \bullet de hoogte waar we de windsnelheid willen kennen (meestal gondelhoogte): $z_2~[{\rm m}]$
- de gemiddelde windsnelheid \bar{v} [m/s]
- de turbulentie lengteschaal: L [m] met

$$L = \begin{cases} 20 \cdot h & als \ h \le 30\\ 600 & als \ h > 30 \ m \end{cases}$$
(3.6)

• de ruwheidslengte: z_0 [m]

Terreintype	z_0 [m]
Open zee, zand	10^{-4} tot 10^{-3}
Besneeuwd oppervlak	10^{-3} tot $5 \cdot 10^{-3}$
Gemaaid gras, steppe	10^{-3} tot 10^{-2}
Lang gras, rotsachtige ondergrond	0,04 tot 0,1
Bossen, steden, heuvelachtige gebieden	1 tot 5

Tabel 3.2: Ruwheidslengte z_0 bij verschillende terreintypes.

De ruwheidslengte z_0 is afhankelijk van het landschap in de omgeving van de windturbine. In Tabel 3.2 staan enkele waarden van z_0 vermeld. Om uit bovenstaand spectrum een turbulente windcomponent in functie van de tijd te verkrijgen, wordt volgende methode toegepast [10, 11]. De turbulente component kan nu als volgt geschreven worden:

$$v_{\rm t}(t) = 2\sum_{i=1}^{N} A_i \,\sin(2\pi f_i \cdot t) + B_i \,\cos(2\pi f_i \cdot t) \tag{3.7}$$

met

$$A_i = \sqrt{\frac{1}{2}S(f_i)\Delta f} \cdot \sin(\phi_i) \tag{3.8}$$

$$B_i = \sqrt{\frac{1}{2}S(f_i)\Delta f \cdot \cos(\phi_i)}$$
(3.9)

$$f \in [0..f_{\max}] \ en \ i \in [1..N]$$
 (3.10)

$$\Delta f = \frac{f_{\max}}{N} \tag{3.11}$$

$$f_i = (i - \frac{1}{2}) \cdot \Delta f \tag{3.12}$$

en de fase ϕ_i is een willekeurige variabele, met een uniforme distributie in het interval $[0, 2\pi]$. De turbulente component wordt voorgesteld in Figuur 3.5. De werkelijke windsnelheid die met dit



Figuur 3.5: Turbulentie. $z_0 = 2 \text{ m}, z_2 = 15 \text{ m}, L = 300 \text{ m}, \bar{v} = 6 \text{ m/s}, i = [1..100000] \text{ en } f_{\text{max}} = 1 \text{ Hz}.$

model gesimuleerd wordt, is de som van deze vier componenten, zijnde de **gemiddelde windsnelheid**, **hellingen in de windsnelheid**, **windvlagen** en de **turbulentie**. Dit windsignaal kan nu aangelegd worden op het turbinemodel. Een voorbeeld wordt gegeven in Figuur 3.6.



Figuur 3.6: Gesimuleerde windsnelheid.

3.2.2 Model op basis van het Van der Hoven spectrum

Een tweede methode is gebaseerd op het Van der Hoven spectrum. Dit spectrum wordt algemeen aanzien als één van de beste representaties van het windsnelheidspectrum [12], [13]. In Figuur 3.7 is het Van der Hoven spectrum te zien. De figuur is verdeeld in een gebied met lage frequentie, dat de gemiddelde windsnelheid en de trage variaties bevat, en één met hoge frequentie, dat de turbulente component weergeeft. Het vermogenspectrum is weergegeven over een gebied van 0,0007 to 900 cycli/h, wat informatie geeft over de energie-inhoud van bijna alle mogelijke windsnelheden. Door het bemonsteren (Engels: sampling) van het Van der Hoven spectrum



Figuur 3.7: Van der Hoven spectrum.

kan een numeriek model voor de windsnelheid worden opgebouwd. We beschouwen de discrete hoekfrequenties ω_i , i = 1, 2, ..., N+1 en bepalen de bijhorende waarde van het vermogenspectrum $S_{vv}(\omega_i)$. De harmonische bij een hoekfrequentie ω_i heeft als amplitude A_i

$$A_{i} = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{1}{2}} [S_{vv}(\omega_{i}) + S_{vv}(\omega_{i+1}] \cdot [\omega_{i+1} - \omega_{i}]$$
(3.13)

en een fase φ_i die willekeurig wordt gegenereerd, met een uniforme distributie in het interval $[\pi, -\pi]$.

De windsnelheid v(t) wordt nu bepaald uit de volgende relatie

$$v(t) = A_0 + \sum_{i=1}^{N} A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$$
(3.14)

hierbij is $\omega_0 = 0$, $\varphi_0 = 0$ en $A_0 = \bar{v}$. \bar{v} is de gemiddelde windsnelheid, berekend over een tijdspanne groter dan de grootste periode in het Van der Hoven spectrum, zijnde $T = 2\pi/\omega_1$. In Figuur 3.8 is een voorbeeld te zien van de variatie in de windsnelheid over een periode van vijf uur, berekend met de vergelijkingen (3.13) en (3.14). Volgende waarden van de parameters werden hierbij gebruikt: N = 55, $f_i = i \cdot 10^k$ met i = 1, 2, ..., 9 en k = -3, -2, -1, 0, 1, 2. In



Figuur 3.8: Gesimuleerde windsnelheid op basis van het Van der Hoven spectrum.

Figuur 3.8 kan men twee zaken opmerken [13]:

- er zijn grote variaties in de gemiddelde windsnelheid, wat aangeeft dat het Van der Hoven model de veranderingen op gemiddelde en lange termijn goed simuleert
- de turbulentie heeft overal dezelfde grootte, ongeacht de windsnelheid

Het Van der Hoven model is zeer geschikt om de gemiddelde windsnelheid en de bijhorende trage variaties in de windsnelheid goed te simuleren. De simulatie van turbulentie is echter een heel stuk minder, want deze hangt niet af van de gemiddelde snelheid. Net zoals in het model gebaseerd op de gemiddelde snelheid wordt turbulentie behandeld als een stationair proces. Er wordt dus opnieuw geen rekening gehouden met het feit dat de turbulentie toeneemt bij hogere snelheden.

3.2.3 Model op basis van het von Karman spectrum

De basis van dit model is de turbulentiecomponent gegeven door het von Karman vermogenspectrum [13]:

$$S_{\rm vv}(\omega) = \frac{0,475\sigma^2 \frac{L}{\bar{v}}}{\left[1 + \left(\frac{\omega L}{\bar{v}}\right)^2\right]^{5/6}}$$
(3.15)

hierbij is L de turbulentie lengteschaal zoals hoger al gedefinieerd, σ de afwijking t.o.v. \bar{v} en \bar{v} de gemiddelde snelheid. De turbulentie intensiteit wordt gegeven door onderstaande formule:

$$I_{\rm turb} = \frac{\sigma}{\bar{v}} \cong \frac{1}{\ln(z/z_0)} \tag{3.16}$$

met z de hoogte waar we de windsnelheid willen kennen. Vergelijking (3.16) leert ons dat de turbulentie over het algemeen afneemt met toenemende hoogte. Als er veel obstakels in de omgeving zijn, neemt de turbulentie toe. Bij dit model is de turbulentie wel expliciet afhankelijk van de gemiddelde windsnelheid (zie Formule (3.15)).

Een simulatiemethode die gebruik maakt van bovenstaand von Karman spectrum werkt met een vormfilter met als ingang witte ruis [13]. De transfertfunctie van deze vormfilter heeft volgende uitdrukking:

$$H_{\rm F}(j\omega) = \frac{K_{\rm F}}{(1+j\omega T_{\rm F})^{5/6}}$$
(3.17)

waarbij de parameters $K_{\rm F}$ en $T_{\rm F}$ volgende uitdrukkingen hebben

$$K_{\rm F} \approx \sqrt{\frac{2\pi}{B\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{3}\right)} \cdot \frac{T_{\rm F}}{T_{\rm S}}} \tag{3.18}$$

$$T_{\rm F} = \frac{L}{\bar{v}} \tag{3.19}$$

 $T_{\rm S}$ is de bemonsteringsperiode en B stelt de Betafunctie voor. Witte ruis wordt als ingang van de filter (3.17) genomen. Witte ruis is een signaal waarbij in het frequentiespectrum de amplitude voor iedere frequentie gelijk is. De resulterende uitgang $w_{\rm c}(t)$ is gekleurde ruis. In tegenstelling tot witte ruis zijn in het frequentiespectrum de amplitudes van de verschillende frequenties niet meer gelijk. De filter zorgt er dus voor dat in het uitgangssignaal de amplitudes van bepaalde frequenties onderdrukt worden zodat de turbulente component van de windsnelheid correct gemodelleerd wordt. Om uit de gekleurde ruis de turbulente component $v_{\rm t}(t)$ te verkrijgen dienen we $w_{\rm c}(t)$ te vermenigvuldigen met de geschatte waarde van de standaardafwijking $\hat{\sigma}_{\rm v}$:

$$v_{\rm t}(t) = \hat{\sigma}_{\rm v} \cdot w_{\rm c}(t) \tag{3.20}$$

De parameter $\hat{\sigma}_{v}$ wordt berekend met onderstaande formule:

$$\hat{\sigma}_{\mathbf{v}} = k_{\sigma,\mathbf{v}} \cdot \bar{v} \tag{3.21}$$

 $k_{\sigma,v}$ wordt experimenteel bepaald als de helling van de regressiecurve die het verband tussen $\hat{\sigma}_{v}$ en \bar{v} beschrijft. Uit metingen wordt voor elke gemiddelde windsnelheid \bar{v} de standaardafwijking $\hat{\sigma}_{v}$ bij deze windsnelheid bepaald. De bekomen waarden kunnen worden uitgezet zoals in Figuur 3.9 en hieraan kan de best passende curve gefit worden. De helling van deze curve is $k_{\sigma,v}$. Dit



Figuur 3.9: Voorbeeld van een regressiecurve.

model kan nu gebruikt worden om de windsnelheid te genereren voor een bepaalde plaats met

turbulentie lengte L en $k_{\sigma,v}$. In tegenstelling tot het Van der Hoven model is dit model niet in staat om de traagvariërende fluctuaties te simuleren. Turbulentie wordt wel op een correcte manier gesimuleerd.

3.2.4 Gecombineerd model: Van der Hoven en von Karman

Uit het voorgaande is gebleken dat het Van der Hoven model zeer goed is in het simuleren van de laag frequente fluctuaties in de windsnelheid, turbulentie wordt heel wat minder nauwkeurig voorspeld. Het model op basis van het von Karman spectrum geeft daarentegen wel een correcte weergave van turbulentie. Het ligt dus voor de hand om beide modellen te combineren, waarbij het Van der Hoven model voor lage frequenties aangevuld wordt met het niet-stationaire turbulentiemodel van von Karman [13].

We veronderstellen dat de discrete frequenties $f_0 = 0$, $f_1 = 0,0001$ cycli/h, ..., $f_{30} = 3$ cycli/h uit het Van der Hoven model overeenkomen met het frequentiegedeelte dat de gemiddelde en langetermijn windsnelheden (trage variaties) bepaalt. De turbulente component (snelle variaties) komt dan overeen met het frequentiegebied tussen 4 en 1000 cycli/h. De uitdrukking voor de windsnelheid v(t) wordt dus:

$$v(t) = v_{\rm ml}(t) + v_{\rm t}(t)$$
 (3.22)

1. met $v_{\rm ml}(t)$ als gemiddelde en langetermijn component, bepaald met het Van der Hoven model:

$$v_{\rm ml}(t) = \sum_{i=0}^{30} A_i \, \cos(\omega_i t + \varphi_i) \tag{3.23}$$

2. $v_{\rm t}(t)$ is de turbulente component, bepaald met het von Karman model.

Om nauwkeurige simulaties van de turbulentie te kunnen maken, dienen de parameters L en $k_{\sigma,v}$ bekend te zijn. Beide parameters zijn echter gecorreleerd: voor sites aan de kust en offshore is de turbulentie lengte L klein (100 m ... 200 m) net zoals $k_{\sigma,v}$ (0,1 ... 0,15). In gevallen waar de omgeving een belangrijkere rol speelt zijn de waarden voor L en $k_{\sigma,v}$ hoger (respectievelijk 200 m ... 500 m en 0,15 ... 0,25).

Om de turbulente component $v_t(t)$ te bepalen zijn er verschillende mogelijkheden. Enerzijds kan gewerkt worden met de filter (3.17) en zo de turbulente component berekenen. De andere methode steunt op een vereenvoudigde transfertfunctie als vormfilter. Het voordeel is dat deze methode heel wat minder rekenkracht vergt en bijgevolg sneller is. Beide methodes leveren bovendien een gelijkaardig resultaat op [13]. Het is echter niet noodzakelijk een nadeel dat de exacte methode trager is en meer rekenkracht vergt. De simulatie van de windsnelheid kan immers vooraf gedaan worden en als een reeks van data worden opgeslagen. Deze data kunnen dan in het simulatiemodel worden ingelezen om simulaties uit te voeren. De volledige wiskundige beschrijving wordt hier niet meegegeven, aangezien deze behoorlijk uitvoerig is [13]. In Figuur 3.10 is een voorbeeld te zien van de variatie van de windsnelheid over een periode van vijf uur, berekend met de rationale benadering van de vormfilter. Er is duidelijk te zien dat de turbulentie afhankelijk is van de gemiddelde windsnelheid: bij hoge gemiddelde windsnelheid is de turbulente component groter dan bij lage gemiddelde windsnelheid.

3.2.5 Windschering en torenschaduw

In het voorgaande hebben we gewerkt met één windsnelheid die de windsnelheid ter hoogte van de windturbine voorstelt. In werkelijkheid is de windsnelheid niet constant over de oppervlakte die door de bladen wordt beschreven. We krijgen dus een driedimensionaal windveld. De windsnelheid op de verschillende plaatsen van de rotoroppervlakte kan sterk verschillen, zowel



Figuur 3.10: Gesimuleerde windsnelheid op basis van het gecombineerd model.

in gemiddelde snelheid als in turbulentie. Twee zaken die een belangrijke invloed hebben op het windveld zijn windschering (Engels: wind shear) en torenschaduw.

- Windschering: kan opgedeeld worden in een horizontale en verticale component. Zoals eerder vermeld verandert de windsnelheid met de hoogte, dit geeft de verticale component. Variaties in de windsnelheid op twee plaatsen van het rotoroppervlak die op dezelfde hoogte gelegen zijn, geven aanleiding tot een horizontale component. Deze variaties in de windsnelheid op eenzelfde hoogte zijn het gevolg van het grillige karakter van de wind. De wind waait dus niet noodzakelijk overal even hard. Omdat de wieken roteren resulteert windschering in fluctuaties van het koppel. De bladen 'zien' immers een steeds wisselende windsnelheid.
- **Torenschaduw**: ter hoogte van de toren worden de stroomlijnen van het windveld afgebogen. Hierdoor vermindert de grootte van de windcomponent die aanleiding geeft tot het koppel. Iedere keer als een blad de toren passeert, is er een kleine dip in het koppel.

Strikt genomen behoren bovenstaande fenomenen tot het windmodel. Het is immers het windveld dat onder invloed van windschering en torenschaduw veranderingen ondergaat. Het belang van deze verstoringen is echter sterk afhankelijk van de technische details van de windturbine: hoe hoog is de toren, hoe ver staan de wieken van de toren, welke diameter beschrijven de wieken gedurende een rotatie, ... Daarom worden beide effecten in het turbinemodel beter gekarakteriseerd.

3.3 Turbinemodel

Naast het windmodel dient er ook een turbinemodel opgesteld te worden. Wanneer men een zeer nauwkeurig model van de rotor wil, moet gebruik gemaakt worden van de zogenaamde blade element theory [2]. De theorie is gebaseerd op de analyse van de krachten op een radiaal bladelement met infinitesimale lengte. Hierbij splitst men de cilindrische stroombuis beschreven door de rotor op in infinitesimaal kleine ringvormige stroombuisjes die elke afzonderlijk kunnen behandeld worden. Zo verkrijgt men een zeer nauwkeurig model van de rotor. Het heeft wel enkele belangrijke nadelen:

• het is niet voldoende om één bepaald windsnelheidsignaal aan te leggen, maar er moeten verschillende signalen gekozen worden die het windveld simuleren.

- men dient te beschikken over gedetailleerde informatie over de geometrie van de rotor.
- de berekeningen worden ingewikkeld en lang.

Daarom wordt er vaak gebruik gemaakt van een eenvoudiger model om de rotor te simuleren, zeker als we vooral geïnteresseerd zijn in het elektrische gedrag van de windturbine. Het turbinemodel dient volgende zaken correct te beschrijven:

- het uitgaand vermogen in functie van de windsnelheid en de rotorsnelheid
- de inertie van de turbine om het transiënt mechanisch gedrag te simuleren
- de invloed van windschering en torenschaduw

3.3.1 Algemene beschrijving van de turbine

Zoals eerder aangehaald zou het heel wat moeilijkheden meebrengen om te werken met een driedimensionaal windsnelheidsveld. Daarom wordt ervoor gekozen om slechts één windsnelheid te beschouwen ter hoogte van de gondel. Volgende formule is algemeen aanvaard als een goede weergave van het kinetisch vermogen vervat in de wind [2, 14–17]:

$$P_{\rm wind} = \frac{1}{2}\rho \,A\,v^3 \tag{3.24}$$

 ρ stelt hierbij de dichtheid [kg/m³] van lucht voor, A is de oppervlakte beschreven door de rotor: $A = \pi r^2$ waarbij r de rotorstraal is en v is de windsnelheid parallel met de as van de turbine. Een gedeelte van dit vermogen wordt door de turbine omgezet in mechanisch vermogen $P_{\rm t}$ beschikbaar op de as:

$$P_{\rm t} = \frac{1}{2} C_{\rm p} \,\rho \,A \,v^3 \tag{3.25}$$

 $C_{\rm p}$ wordt aangeduid als de vermogenscoëfficiënt. De maximale waarde die $C_{\rm p}$ kan aannemen is 16/27 = 0,593, ook gekend als de Betz limiet [3]. In de praktijk ligt deze waarde heel wat lager door onvolmaakte windstroming en wrijving. Een goede richtwaarde voor $C_{\rm p,max}$ is 0,4. Voor windturbines wordt $C_{\rm p}$ meestal geschreven in functie van twee parameters, namelijk de stelhoek θ en de snellopendheid λ (Engels: tip-speed ratio, TSR) zodat we de tweedimensionale functie $C_{\rm p}(\lambda, \theta)$ krijgen. De snellopendheid λ wordt gedefinieerd als:

$$\lambda = \frac{v_{\rm tip}}{v} = \frac{r \cdot \omega_{\rm m}}{v} \tag{3.26}$$

hierbij is v_{tip} de tipsnelheid [m/s], r de straal van de turbine en ω_m de hoeksnelheid van de turbine [rad/s]. De snellopendheid drukt de verhouding uit van de tipsnelheid van een turbineblad tot de windsnelheid. Daarnaast is $C_p(\lambda, \theta)$ ook nog afhankelijk van de stelhoek θ . Het veranderen van deze hoek heeft invloed op de liftcoëfficiënt van de turbinebladen en dus op de vermogenscoëfficiënt. Rekening houdend met al het voorgaande krijgen we dus volgende uitdrukking voor het uitgaand vermogen en het turbinekoppel [18]:

$$P_{\rm t} = \frac{1}{2} C_{\rm p}(\lambda, \theta) \,\rho \,\pi \,r^2 \,v^3 \tag{3.27}$$

$$T_{\rm t} = \frac{C_{\rm p}(\lambda,\theta)\,\rho\,\pi\,r^2\,v^3}{2\omega_{\rm m}} \tag{3.28}$$

Het vermogen dat een windturbine bij een gegeven windsnelheid kan opwekken is dus enkel afhankelijk van de waarde van $C_{\rm p}$ en de rotatiesnelheid $\omega_{\rm m}$ (als we de invloed van de hoogte en de temperatuur op de dichtheid van lucht even buiten beschouwing laten). $C_{\rm p}$ is een zéér belangrijke parameter die in volgende paragraaf besproken wordt.
3.3.2 De vermogenscoëfficiënt $C_{\rm p}(\lambda, \theta)$

Het gedrag van een windturbine wordt dus hoofdzakelijk bepaald door $C_{\rm p}(\lambda, \theta)$. Het verloop van $C_{\rm p}(\lambda, \theta)$ is een eigenschap van de gekozen windturbine. Verschillende turbines hebben dus meestal een verschillende $C_{\rm p}$ -waarde. Dit kan grafisch worden voorgesteld als een oppervlak met als parameters λ en θ .

Het verloop van $C_{\rm p}(\lambda, \theta)$ kan ook uitgezet worden als een verzameling van $C_{\rm p}(\lambda)$ curves bij verschillende waarden voor de stelhoek θ . Dit kan geëxtrapoleerd worden door een polynoom te fitten aan de opgegeven waarden. Een mogelijke polynoom voor *curve-fitting* is [15]:

$$C_{\rm p}(\lambda,\theta) = \sum_{i=0}^{4} \sum_{j=0}^{4} \alpha_{i,j} \theta^i \lambda^j$$
(3.29)

Wanneer er echter naar de datasheets van de verschillende fabrikanten wordt gekeken, valt het op dat het verloop van $C_{\rm p}(\lambda, \theta)$ meestal niet wordt opgegeven. In de literatuur worden er wel enkele curves voorgesteld, die vaak een gelijkaardige vorm hebben (vooral voor turbines van hoog vermogen). Het is dus niet echt nodig om voor elke turbine een verschillend verloop van $C_{\rm p}(\lambda, \theta)$ te beschouwen. Daarentegen kan een algemene benadering worden beschouwd [17]:

$$C_{\rm p}(\lambda,\theta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\theta - c_4\theta^{c_5} - c_6\right) \exp\left(-\frac{c_7}{\lambda_i}\right)$$
(3.30)

met

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + c_8 \theta} - \frac{c_9}{\theta^3 + 1}} \tag{3.31}$$

De parameters uit vergelijkingen (3.30) en (3.31) staan opgelijst in Tabel 3.3.

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9
Constante snelheid	$0,\!44$	125	0	0	0	$6,\!94$	16,5	0	-0,002
Variabele snelheid	0,73	151	$0,\!58$	0,002	$2,\!14$	13,2	18,4	-0,02	0,003

Tabel 3.3: Parameters horend bij vergelijkingen (3.30) en (3.31).

Tot nu toe zijn we ervan uitgegaan dat $C_{\rm p}(\lambda, \theta)$ functie is van zowel λ als θ . Dit impliceert dat de windturbine over een mechanisme beschikt dat de stelhoek θ van de turbinebladen kan wijzigen. Dit mechanisme is echter vaak niet aanwezig bij kleine windturbines aangezien de kosten voor het systeem meestal te hoog zijn in vergelijking met de toename in energie-opbrengst en de kost van de andere onderdelen zoals de convertor en generator. Aangezien de stelhoek bij de meeste kleine windturbines vast is, kunnen we θ gelijk aan nul stellen. We krijgen dan volgende uitdrukkingen voor $C_{\rm p}(\lambda)$:

$$C_{\rm p}(\lambda) = \alpha_4 \,\lambda^4 + \alpha_3 \,\lambda^3 + \alpha_2 \,\lambda^2 + \alpha_1 \,\lambda + \alpha_0 \tag{3.32}$$

waarbij de parameters α_i dienen gefit te worden met gegevens van de fabrikant. Voor turbines met een variabele snelheid bekomen we uit vergelijkingen (3.30) en (3.31):

$$C_{\rm p}(\lambda) = 0,73 \left(\frac{151}{\lambda} - 13,65\right) \exp\left(\frac{-18,4}{\lambda} + 0,055\right)$$
 (3.33)

Tot slot vermelden we nog twee andere curves voor C_p die in de literatuur worden voorgesteld [19–21]:

$$C_{\rm p}(\lambda) = (1, 12\,\lambda - 2, 8)\,\exp\left(-0, 38\,\lambda\right)$$
 (3.34)

$$C_{\rm p}(\lambda) = 0,44\,\sin\left(\frac{\pi}{2}\cdot\frac{\lambda-3}{7,5}\right) \tag{3.35}$$

In Figuur 3.11 staan de verschillende vergelijkingen weergegeven. Men ziet duidelijke verschillen tussen de verschillende C_p -curves. Het blijkt dat de verschillende C_p -curves allemaal ongeveer



Figuur 3.11: C_p -curves: — = vergelijking (3.33), - - = vergelijking (3.34), ... = vergelijking (3.35).

dezelfde maximale waarde hebben (rond 0,44). De snellopendheid λ waarbij dit maximum bereikt wordt, is echter sterk verschillend. Dit doet vermoeden dat de verschillende curves horen bij turbines met een andere nominale assnelheid. De vermelde vermogenscoëfficiënten horen allemaal bij grote windturbines, omdat er daar al heel wat onderzoek op gebeurde. Voor kleine windturbines is dit veel minder het geval. In dit eindwerk zal er dan ook noodgedwongen één van de bovenstaande C_p -curves gekozen worden voor het simulatiemodel en de emulatoropstelling.

3.3.3 Inertie van de turbine

Om het dynamisch gedrag van de windturbine correct te kunnen simuleren, dienen we de inertie van de turbine in rekening te brengen. Bij overgangsverschijnselen speelt de opgeslagen kinetische energie in de windturbine een belangrijke rol. De kinetische energie in een windturbine bestaat uit de kinetische energie van de roterende bladen, de versnellingskast en de generator. De inertie van de turbine is van zeer groot belang aangezien ze veel groter is dan de inertie van de generator en de (eventuele) versnellingskast, zoals later zal blijken. Bij aanwezigheid van een versnellingskast zal de generator echter sneller draaien dan de turbinebladen, wat ook in een grote opgeslagen kinetische energie resulteert. De kinetische energie opgeslagen in een roterende massa wordt gegeven door [22]:

$$E = \frac{1}{2}J\omega^2 \tag{3.36}$$

De inertie J van een lichaam wordt gegeven door:

$$J = \sum m_i r_i^2 \tag{3.37}$$

hierbij is r_i de radiale afstand van de traagheidsas tot het overeenkomend deeltje met massa m_i . De sommatie loopt over alle deeltjes van het lichaam. Om de inertie van een windturbine

te benaderen wordt verondersteld dat het massamiddelpunt van elk blad gelegen is op ongeveer 1/3 van de straal. De totale inertie J_t van een driebladige turbine wordt dan gegeven door:

$$J_{\rm t} = 3m_{\rm blad} \left(\frac{r}{3}\right)^2 = \frac{1}{9}m_{\rm rotor}r^2$$
(3.38)

 m_{blad} stelt hierbij de massa van één turbineblad voor, m_{rotor} is de massa van de volledige rotor, r is rotorstraal.

Voor turbines uit de MW-klasse bestaat er zelfs een benaderend verband tussen rotordiameter en nominaal vermogen [22]:

$$P_{\rm nom} = 195 \left(d_{\rm rotor} \right)^{2,155} \tag{3.39}$$

Er bestaat ook een benaderend verband tussen rotormassa en rotordiameter [22]:

$$m_{\rm rotor} = 0,486 \, (d_{\rm rotor})^{2,6}$$
 (3.40)

 P_{nom} is het nominaal vermogen uitgedrukt in MW, d_{rotor} is de rotordiameter in m en m_{rotor} is de rotormassa in kg.

De inertie van de turbine J_t kan rechtstreeks in het simulatieprogramma gebruikt worden. Wanneer we echter een emulator willen bouwen waarbij een motor de turbine nabootst, dan zal deze motor ook correct de inertie van de turbine moeten nabootsen. De motor zal dus een compensatiekoppel moeten leveren om een waarheidsgetrouwe voorstelling van de turbine te zijn.

3.3.4 Invloed van windschering en torenschaduw

Wanneer we het uitgaand vermogen van een windturbine bekijken, zijn er heel wat fluctuaties zichtbaar. Deze fluctuaties zijn zowel van stochastische als periodische aard. De stochastische variaties zijn te wijten aan het onregelmatige karakter van de windsnelheid (turbulenties e.d.). De periodische variaties zijn inherent aan de werking en de bouw van de windturbine. De notatie 1p slaat op de frequentie waaraan de rotor ronddraait, 3p geeft de frequentie waarmee de bladen de toren passeren, zijnde drie keer de rotorfrequentie. We onderscheiden volgende periodische variaties in het uitgaand vermogen van een windturbine [23]:

- pulsaties bij de resonantiefrequentie van de toren. Onder invloed van de wind ontstaan er krachten en momenten die de gondel zijwaarts doen bewegen. Deze beweging gebeurt met de eigenfrequentie van de toren. De zijwaartse beweging van de gondel zorgt eigenlijk voor een hoekverandering van de gondel (zie Figuur 3.12). Bij inductiemachines zorgt dit voor een kleine verandering in de slip, bij synchrone machines zal de lasthoek wijzigen. In beide gevallen heeft dit een invloed op het koppel en dus het uitgaand vermogen.
- 1p pulsaties. In sommige gevallen fluctueert het vermogen met de frequentie waaraan de rotor ronddraait (1p pulsaties). Dit kan het gevolg zijn van een slecht uitgebalanceerde rotor. Een andere mogelijke oorzaak is dat één van de bladen meer koppel produceert dan de andere bladen. Men heeft ook opgemerkt dat 1p pulsaties meer uitgesproken zijn wanneer de windturbine in het zog van een andere turbine werkt [23].
- **3p** pulsaties. Dit zijn vermogenfluctuaties met een frequentie gelijk aan drie maal de rotorfrequentie. De oorzaken hiervan zijn horizontale en verticale variaties in de windsnelheid (windschering) en torenschaduw. Voor windschering en torenschaduw bestaat er een uitgewerkt model dat verder kort wordt toegelicht.



Figuur 3.12: Zijwaartse oscillaties van de toren.

• **np pulsaties en overige**. Er zijn natuurlijk nog andere pulsaties in het vermogen mogelijk zoals 2p en 6p pulsaties, vaak te wijten aan onvolmaaktheden van de windturbine. Andere onderdelen, zoals de versnellingskast, kunnen ook pulsaties in het vermogen teweegbrengen. Over het algemeen zijn deze fluctuaties echter van minder groot belang.

Tot hiertoe werden de effecten van windschering en torenschaduw enkel kort besproken. Hier geven we eerst een kwalitatieve bespreking van de oorzaken van beide fenomenen. Dan volgen de resultaten van een uitgebreide wiskundige analyse [24], [25]. Het voordeel van het ontwikkelde model is dat het zeer gemakkelijk in het bovenstaande model kan worden opgenomen.

Windschering

Wanneer een turbineblad ronddraait, ondervindt het een andere windsnelheid op de verschillende hoogtes. Deze variatie in windsnelheid wordt **windschering** genoemd. We weten reeds dat de windsnelheid normaal gezien toeneemt met toenemende hoogte. Een blad dat zich bovenaan bevindt, zal dus een grotere windsnelheid ondervinden dan een blad dat beneden is. Door het periodisch variëren van de windsnelheid wanneer een turbineblad een volledige cyclus doorloopt, ontstaan schommelingen in het koppel en het vermogen. Gedurende iedere rotatie pulseert het koppel drie keer, daar elk blad doorheen de maximale en minimale windsnelheid passeert. Om de invloed van windschering te begroten, zou men kunnen gebruik maken van een windveld over de rotor. De eenvoud van één enkele windsnelheid op gondelhoogte gaat dan wel verloren. De hierna toegelichte methode heeft het grote voordeel dat één enkele windsnelheid op gondelhoogte behouden blijft en dat de invloed van windschering toch goed beschreven wordt. Het doel van deze analyse is het bekomen van een equivalente windscheringscomponent die eenvoudigweg bij de windsnelheid uit het windmodel wordt opgeteld. De analyse start van de uitdrukking voor windschering:

$$v(z) = V_{\rm h} \left(\frac{z}{h}\right)^{\alpha} \tag{3.41}$$

Deze formulering wordt omgezet in een uitdrukking in functie van de azimutale hoek θ en de radiale afstand tot het rotorcentrum r_i :

$$v(r,\theta) = V_{\rm h} \left(\frac{r_i \cos(\theta) + h}{h}\right)^{\alpha} = V_{\rm h}[1 + W_{\rm S}(r_i,\theta)]$$
(3.42)

 $V_{\rm h}$ stelt hierbij de windsnelheid op gondelhoogte voor, h is de hoogte van de gondel boven de grond, α is de empirische windscheringsexponent, z is de hoogte boven de grond en $W_{\rm S}(r_i, \theta)$ stelt de verstoring van de windsnelheid ten gevolge van windschering voor. De term $W_{\rm S}(r_i, \theta) V_{\rm h}$ wordt opgeteld bij de windsnelheid op gondelhoogte. Deze uitdrukking wordt benaderd door

een Taylorontwikkeling die afgebroken wordt na de derde term:

$$W_{\rm S}(r_i,\theta) \approx \alpha \left(\frac{r_i}{h}\right) \cos(\theta) + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2} \left(\frac{r_i}{h}\right)^2 \cos^2(\theta) + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{6} \left(\frac{r_i}{h}\right)^3 \cos^3(\theta) \quad (3.43)$$

We zijn nu in staat om de windsnelheid in elk punt van de rotoroppervlakte te bepalen. Om een equivalente windsnelheid ten gevolge van windschering te bekomen dient er nu rekening gehouden te worden met het feit dat de turbine uit drie bladen bestaat die over 120° t.o.v. elkaar verdraaid zijn en dat er geïntegreerd moet worden over de bladlengte. Volgende uitdrukking wordt bekomen (voor de volledige uitwerking: zie [25]):

$$v_{\rm eq_{ws}} = V_{\rm h} \left[\frac{\alpha(\alpha-1)}{8} \frac{r^2}{h^2} + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{60} \frac{r^3}{h^3} \cos(3\theta_1) \right]$$
(3.44)

De totale wind op gondelhoogte, rekening houdend met windschering wordt nu:

$$v(t,\theta) = V_{\rm h} + v_{\rm eq_{ws}} \tag{3.45}$$

Torenschaduw

De windverdeling wordt ook sterk beïnvloed door de aanwezigheid van de toren. Er is een duidelijk verschil tussen windturbines waar de rotor zich tegen de wind in (Engels: upwind) of benedenwinds (Engels: downwind) bevindt. Bij de turbines van hoog vermogen worden er tegenwoordig quasi uitsluitend 'upwind'-turbines gebouwd. Bij deze windmolens wordt de wind recht voor de turbine afgeleid (zie Figuur 3.13), waardoor het koppel van elk blad dat voor de toren passeert, vermindert. Dit effect wordt **torenschaduw** genoemd. Voor dit type van



Figuur 3.13: Verstoring van de stroming rond de toren.

torenschaduw werd er dan ook een nauwkeurig model ontwikkeld. Bij de turbines van laag vermogen worden er wel vaak 'downwind'-turbines gebouwd. Zoals reeds vermeld, is er heel wat minder onderzoek uitgevoerd naar deze kleine windturbines, waardoor er geen model voor torenschaduw beschikbaar is voor downwind-turbines. De kleine windturbine in dit eindwerk is dus van het upwind-type, zodat het model voor torenschaduw uit de literatuur kan aangewend worden. Net zoals bij windschering is het doel van de analyse het bekomen van een equivalente windsnelheid die het toreneffect weergeeft. Op basis van modellen uit de stromingsleer, bekomt men volgende uitdrukkingen voor de snelheid rond de toren:

$$V(x,y) = V_{\rm h} + v_{\rm toren}(x,y) \tag{3.46}$$

$$v_{\text{toren}}(x,y) = V_0 a^2 \frac{y^2 - x^2}{\left(x^2 + y^2\right)^2}$$
(3.47)

hierbij is V_0 de gemiddelde windsnelheid over de rotor, y de laterale afstand van het blad tot de middenlijn van de toren, x de afstand van het blad tot het midden van de toren en a de straal van de toren (zie Figuur 3.14). (Opmerking: In de vergelijking voor windschering wordt gebruik gemaakt van de windsnelheid ter hoogte van de gondel $V_{\rm h}$, terwijl we hier de gemiddelde windsnelheid V_0 zien verschijnen. Het is mogelijk om V_0 in functie van V_h te schrijven door de factor m in te voeren in volgende uitdrukking. Het verschil tussen V_0 en V_h is daarenboven in de meeste gevallen verwaarloosbaar.) We vormen (3.47) opnieuw om naar azimutale hoek θ en

2a

Figuur 3.14: De belangrijkste afmetingen gebruikt in het model van torenschaduw.

radiale afstand r_i , normeren met $V_{\rm h}$ en bekomen:

$$\overline{v}_{\text{toren}} = ma^2 \frac{r_i^2 \sin^2(\theta) - x^2}{\left(r_i^2 \sin^2(\theta) + x^2\right)^2}$$
(3.48)

$$m = \left[1 + \frac{\alpha(\alpha - 1)(r^2)}{8h^2}\right] \tag{3.49}$$

Formule (3.48) geldt enkel voor: 90 ° $\leq \theta \leq 270$ °. Net zoals bij windschering dienen we nu te integreren over de lengte van de turbinebladen en rekening te houden met de drie turbinebladen. De uitwerking is terug te vinden in [25]. Het eindresultaat wordt vermeld:

$$v_{\rm eqts} = \frac{mV_{\rm h}}{3r^2} \sum_{b=1}^3 \left[\frac{a^2}{\sin^2(\theta_b)} \ln\left(\frac{r^2 \sin^2(\theta_b)}{x^2} + 1\right) - \frac{2a^2 r^2}{r^2 \sin^2(\theta_b) + x^2} \right]$$
(3.50)

De totale wind op gondelhoogte, rekening houdend met torenschaduw wordt nu:

$$v(t,\theta) = V_{\rm h} + v_{\rm eq_{ts}} \tag{3.51}$$



Wordt met beide effecten rekening gehouden dan wordt eenvoudig verkregen:

$$v(t,\theta) = V_{\rm h} + v_{\rm eq_{\rm ws}} + v_{\rm eq_{\rm ts}}$$

$$(3.52)$$

In volgende paragraaf worden beide effecten samengevat. Er wordt uitgegaan van het turbinekoppel zonder rekening te houden met beide effecten.

Samenvatting windschering en torenschaduw

Onderstaande formules bevatten de wiskundige beschrijving van beide fenomenen. De uitdrukking voor het genormaliseerde koppel heeft volgende vorm:

$$\overline{T}_{t}(t,\theta) = 1 + \frac{2}{m V_{h}} [v_{eq_{ws}} + v_{eq_{ts}} + (1-m)V_{h}]$$
(3.53)

met hierin:

$$v_{\rm eqts} = \frac{mV_{\rm h}}{3r^2} \sum_{b=1}^{3} \left[\frac{a^2}{\sin^2(\theta_b)} \ln\left(\frac{r^2 \sin^2(\theta_b)}{x^2} + 1\right) - \frac{2a^2 r^2}{r^2 \sin^2(\theta_b) + x^2} \right]$$
(3.54)

$$v_{\rm eq_{ws}} = V_{\rm h} \left[\frac{\alpha(\alpha-1)}{8} \frac{r^2}{h^2} + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{60} \frac{r^3}{h^3} \cos(3\theta_1) \right]$$
(3.55)

$$m = \left[1 + \frac{\alpha(\alpha - 1)(r^2)}{8h^2}\right] \tag{3.56}$$

waarbij $v_{eq_{ts}}$ de component is van de equivalente windsnelheid die veroorzaakt wordt door de torenschaduw, $v_{eq_{ws}}$ de component is van de equivalente windsnelheid die veroorzaakt wordt door windschering, V_h de windsnelheid is ter hoogte van de gondel, r de straal is van de rotor, hde hoogte is van de gondel boven de grond, a de straal is van de toren, x de longitudinale afstand van het blad tot de as van de toren, θ_b de azimutale hoek is van het blad b en α de empirische windscheringsexponent. Bovendien gelden ook nog volgende verbanden tussen de bladhoeken θ_b :

$$\theta = \theta_1, \, \theta_2 = \theta_1 + \frac{2\pi}{3}, \, \theta_3 = \theta_1 + \frac{4\pi}{3}$$
 (3.57)

Het koppel is nu inderdaad afhankelijk van de hoek θ . Om uit bovenstaande vergelijkingen het turbinekoppel te bepalen wordt gebruik gemaakt van volgende vergelijking:

$$T_{\rm t}(t,\theta) = T_{\rm t} \cdot \overline{T}_{\rm t}(t,\theta) \tag{3.58}$$

 $T_{\rm t}$ wordt hierbij berekend met (3.28) en we stellen $V_{\rm h} = v(t)$ waarbij v(t) verkregen wordt uit het windmodel. Op deze manier wordt een koppel $T_{\rm t}(t,\theta)$ gedefinieerd dat afhankelijk is van de variaties in de windsnelheid en rekening houdt met het toreneffect en windschering.

3.3.5 Aerodynamische filters

Zoals vermeld dient men gebruik te maken van een driedimensionaal windveld om de turbine nauwkeurig te beschrijven. Dit wordt vereenvoudigd naar een model waarin slechts één windsnelheid voorkomt, namelijk deze ter hoogte van de gondel. Deze windsnelheid vertoont alle eigenschappen van de werkelijke windsnelheid: trage variatie van de gemiddelde windsnelheid, turbulentie, windstoten, ... Door deze windsnelheid rechtstreeks aan te bieden, wordt het effect van turbulentie overschat. De turbulentiecomponent verschilt namelijk over het rotoroppervlak en een groot gedeelte van de fluctuaties wordt door de turbine uitgefilterd. Daarom kan gebruik gemaakt worden van een reeks aerodynamische filters [26]. Deze filters worden in dit eindwerk niet gebruikt, maar kunnen eventueel wel gebruikt worden bij een verdere verfijning van het windturbinemodel en de emulatoropstelling. Het is dus zeker de moeite waard om deze techniek kort te bespreken.

De invoer van de filters is de windsnelheid die in het windmodel gegenereerd wordt. De uitgang is een equivalente windsnelheid die kan aangeboden worden aan de C_p -curve om zo het koppel en vermogen te berekenen. De eerste filter is de ruimtelijke filter (Engels: Spatial Filter):

$$H_{\rm SF}(s) = \frac{\sqrt{2} + bs}{\left(\sqrt{2} + bs\sqrt{a}\right) \left(1 + \frac{b}{\sqrt{as}}\right)} \tag{3.59}$$

waar a = 0.55, $b = \gamma \cdot r/\bar{v}$ met r gelijk aan de rotorstraal, \bar{v} de gemiddelde windsnelheid op gondelhoogte en $\gamma = 1.3$.

De ruimtelijke filter dempt de hogere frequentiecomponenten aanwezig in de wind. Op deze manier wordt het filterende effect van de turbinebladen weergegeven. De transfertfunctie (3.59) kan worden vereenvoudigd tot een eerste-orde transfertfunctie met slechts een verwaarloosbaar effect op zijn karakteristiek:

$$H_{\rm SF}(s) = \frac{1}{sb+1} = \frac{1}{\frac{s}{2\pi f_{\rm cut}} + 1}$$
(3.60)

waarbij $f_{\rm cut}$ de cut-off frequentie van de filter is.

De tweede filter stelt het bemonsteren van de wind door de turbine voor. Door het roteren wordt elke plaats in het windveld immers één keer per periode bemonsterd. Daarom wordt deze filter de rotationele sampling filter (Engels: Rotational Sampling Filter) genoemd:

$$H_{\rm RSF}(s) = \frac{\frac{1}{\omega^2}(s+\omega)^2}{\frac{1}{(\omega^2+d^2)}[s+(d+j\omega)][s+(d-j\omega)]}$$
(3.61)

hierbij is $\omega = 2\pi Nn/60$, met N het aantal turbinebladen, n de rotorsnelheid [tpm] en d de dempingsfactor.

Deze filter versterkt de variaties in een frequentiegebied rond de frequentie waarmee de bladen de toren passeren. In de andere gebieden heeft de filter een versterkingsfactor van ongeveer één. In Figuur 3.15 staan de dempingsfactor d van de RSF-filter en de cut-off frequentie van de SF-filter voor verschillende turbulentie-intensiteiten. Deze waarden verschillen echter wel van turbine tot turbine.



Figuur 3.15: Dempingsfactor en cut-off frequentie in functie van de gemiddelde windsnelheid.

3.4 Overige Modellen

3.4.1 Transmissiekastmodel

In veel windturbines is een versnellingskast aanwezig. Hier treden er echter behoorlijke verliezen op, dus wordt dit vaak afzonderlijk beschouwd. De viskeuze verliezen zijn afhankelijk van de snelheid:

$$T_{\rm trans} = F_{\rm trans} \cdot \omega_{\rm m} \tag{3.62}$$

$$P_{\rm trans} = F_{\rm trans} \cdot \omega_{\rm m}^2 \tag{3.63}$$

Wanneer er een versnellingskast in de windturbine aanwezig is, dient er ook rekening te worden gehouden met de inertie ervan. Bovendien draaien rotor en generator niet meer aan dezelfde snelheid. De kinetische energie opgeslagen in de generator zal groter zijn, aangezien de generator aan een hogere snelheid draait. De aanwezigheid van een versnellingskast zal dus invloed hebben op het dynamisch gedrag van de windturbine. Bij de emulator die in deze thesis gebouwd wordt, is er een versnellingskast aanwezig tussen de inductiemotor die de turbine nabootst en de synchrone generator. Deze heeft echter niet dezelfde functie als de transmissiekast die in een werkelijke turbine tussen de rotor en de generator aanwezig is. In een werkelijke windturbine dient de versnellingskast om de rotatiesnelheid van de turbinerotor om te zetten in een hogere rotatiesnelheid van de generatoras. Dit is gebruikelijk bij generatoren die over weinig poolparen beschikken. De generator in de emulatoropstelling is echter van het veelpolige type. Indien deze generator in een windturbine wordt ingebouwd, zal deze dus niet via een versnellingskast met de rotor verbonden worden, maar rechtstreeks. De versnellingskast die in de emulatoropstelling aanwezig is, dient om de hoge rotatiesnelheid van de inductiemotor om te zetten in een lagere rotatiesnelheid van de generator. Op deze manier kan de inductiemotor dichter bij de nominale frequentie werken en stellen er zich geen problemen met de koeling van deze motor. Bovendien kan er nu een inductiemotor met een vaak voorkomend toerental (1500 tpm) gebruikt worden. Om het simulatiemodel dus zo goed mogelijk bij de werkelijkheid te laten aansluiten (de situatie zonder transmissiekast) zal het transmissiekastmodel dus niet opgenomen worden in het simulatiemodel.

3.4.2 Generatormodel

Voor het generatormodel moet er een keuze gemaakt worden. Er werd reeds vermeld dat er heel wat mogelijke topologieën zijn wat generator en convertor betreft. De modellen voor inductiemachines en synchrone machines zijn goed gekend, veelvuldig getest en hebben hun juistheid reeds bewezen. Omdat er in deze thesis gebruik wordt gemaakt van een synchrone machine met permanente magneetbekrachtiging, zullen we dan ook enkel dit model meegeven. Modellen voor andere types generatoren kunnen in de literatuur worden teruggevonden [9,15–18,26]. Volgende vergelijkingen werden gebruikt om de generator te modelleren [27]:

$$\Psi_{q} = L_{q}I_{q} + \Psi_{PMq} \tag{3.64}$$

$$\Psi_{\rm d} = L_{\rm d} I_{\rm d} + \Psi_{\rm PMd} \tag{3.65}$$

$$\omega_{\rm e} = \omega_{\rm m} N_{\rm p} \tag{3.66}$$

 $V_{\rm q} = R_{\rm s}I_{\rm q} + sL_{\rm q}I_{\rm q} + E_{\rm PMq} - \omega_{\rm e}L_{\rm d}I_{\rm d}$ (3.67)

$$I_{\rm d} = R_{\rm s}I_{\rm d} + sL_{\rm d}I_{\rm d} + E_{\rm PMd} + \omega_{\rm e}L_{\rm q}I_{\rm q}$$

$$(3.68)$$

$$E_{\rm PMq} = -s\Psi_{\rm PMq} \tag{3.69}$$

$$E_{\rm PMd} = -s\Psi_{\rm PMd} \tag{3.70}$$

3.4.3 Convertormodel

Wanneer de turbine aangesloten wordt op het net, dient er in de meeste gevallen een convertor tussengeschakeld te worden. Als we te maken hebben met een variabele snelheid windturbine, moet de convertor ervoor zorgen dat stromen met de juiste frequentie in het net worden geïnjecteerd. Bovendien zal de convertor de generator naar het juiste werkingspunt sturen zodat het maximale vermogen uit de wind wordt gehaald (*Maximum Power Point Tracking* algoritmes). Een goed convertormodel is dus zeker van belang.

In deze thesis wordt echter enkel het gedeelte van de windturbine tot en met de generator gesimuleerd. Op de klemmen van de generator wordt een variabele weerstandslast aangebracht. Het opstellen van een correct convertormodel valt dus buiten het kader van deze thesis. Ook wat de emulator betreft wordt enkel gebruik gemaakt van een variabele weerstandslast.

3.4.4 Model van het net

Net zoals het convertormodel heeft het model van het net in deze thesis geen belang. Wanneer men echter een compleet model van de windturbine wenst, is een simulatie van het net van groot belang. Op deze manier kan getest worden hoe de turbine reageert op verstoringen (bv. kortsluitingen) in het net. Men kan zien of de sturingen van de turbine onder deze omstandigheden correct functioneren. Indien dit niet het geval is, kunnen hiervoor oplossingen bedacht worden.

Hoofdstuk 4

Simulatiemodel in Matlab/Simulink

4.1 Algemeen

In dit hoofdstuk wordt de opbouw van het simulatiemodel besproken. Zoals reeds vermeld in Hoofdstuk 3, wordt bij het modelleren van een windturbine gewerkt met verschillende deelmodellen. Ook het simulatiemodel zal dus bestaan uit deze verschillende deelmodellen die in Figuur 4.1 zijn weergegeven.



Figuur 4.1: Overzicht simulatiemodel.

- Windmodel: dit model genereert een windsnelheidssignaal dat als ingang dient voor het turbinemodel.
- **Turbinemodel**: het turbinemodel modelleert de omzetting van het vermogen in de wind naar het mechanisch asvermogen.
- Generatormodel: model van de generator dat het mechanisch vermogen omzet in een elektrisch vermogen.
- Lastmodel: model van een variabele driefasige lastweerstand.

Er dient opgemerkt te worden dat het transmissiekastmodel inderdaad buiten beschouwing wordt gelaten omdat dit het best de werkelijkheid benadert. Het convertormodel en netmodel zijn hier weggelaten en vervangen door een eenvoudig model van een variabele driefasige weerstand. Het volledige model van de windturbine werd geïmplementeerd in Matlab/Simulink. De uitwerking van dit model wordt hieronder stap voor stap weergegeven. Tot slot wordt ook een verificatie van de correcte werking van het model meegegeven.

4.2 Windmodel

4.2.1 Keuze van het windmodel

De functie van het windmodel is om het verloop van de windsnelheid doorheen de tijd te modelleren. Hiervoor zijn er twee mogelijkheden:

- men beschikt over meetdata van de windsnelheid
- de windsnelheid wordt gesimuleerd

In beide gevallen rest er nog de keuze over de gewenste nauwkeurigheid:

- er wordt een 3D-windveld over het rotoroppervlak gesimuleerd of gemeten
- er wordt gebruik gemaakt van één enkele gemeten of gesimuleerde windsnelheid op gondelhoogte

Wat betreft de nauwkeurigheid is de keuze snel gemaakt. Aangezien het de bedoeling is om vooral het elektrisch gedrag van de turbine te bestuderen, volstaat het om één enkele windsnelheid op gondelhoogte te beschouwen. Dit zorgt voor een aanzienlijke vereenvoudiging van het model. Daarnaast is er nog de keuze tussen metingen van de windsnelheid (bv. op een bestaande windturbine) en een gesimuleerde reeks van windsnelheden in functie van de tijd. Er wordt geopteerd voor de simulatie van de windsnelheid met behulp van Matlab. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de in de literatuur beschreven technieken die in Hoofdstuk 3 behandeld zijn. Door de opbouw van het simulatiemodel is het echter nog steeds mogelijk om toch meetdata van de windsnelheid in te lezen.

4.2.2 Implementatie in Simulink

In Figuur 4.2 is de implementatie van het windmodel in Simulink te zien. De werking van



Figuur 4.2: Windmodel in Simulink.

het windmodel is eenvoudig. Via de schakelaar (*Manual Switch*) is er de keuze tussen twee manieren om de windsnelheid aan te leggen. Ofwel kiest men voor een constante waarde voor de windsnelheid, de schakelaar staat dan in de bovenste stand. In de initialisatiefile kan deze windsnelheid v aangepast worden. Er kan ook gekozen worden om de windsnelheid in te lezen uit een bestand (*From File*), waarbij de schakelaar in de onderste stand gebracht moet worden. In dit bestand bevinden zich twee kolommen data: de eerste kolom bevat de tijd [s], de tweede kolom bevat de windsnelheid [m/s]. Simulink interpoleert tussen deze discrete gegevens om een vloeiend verloop van de windsnelheid doorheen de tijd te verkrijgen. Hier ligt de sleutel tot de flexibiliteit van het windmodel. Door een ander bestand te selecteren, kan een totaal verschillend verloop van de windsnelheid verkregen worden. Bovendien kunnen er ook meetdata van werkelijke windsnelheid worden ingelezen in het model indien deze op de correcte manier worden opgeslagen en aan het windmodel worden aangeboden. De belangrijkste reden om de windsnelheid uit een apart bestand in te lezen is de benodigde rekenkracht. Het zou teveel rekenkracht vergen om de windsnelheid tijdens de simulatie van de windturbine te berekenen waardoor de simulatieduur erg lang zou worden. Daarom kunnen de benodigde winddata vooraf gesimuleerd worden aan de hand van een Matlabscript. De data worden vervolgens weggeschreven naar een bestand dat door het windmodel kan ingelezen worden. Deze methode zorgt ervoor dat het windturbinemodel niet overladen wordt met de tijdrovende windsimulatie. Bovendien is er tussendoor nog een visuele controle op de gesimuleerde windsnelheid mogelijk zodat men kan besluiten of de berekende data voldoen voor het fenomeen dat men wenst te onderzoeken.

4.2.3 Windmodel in Matlab

In Hoofdstuk 3 staan verschillende methodes beschreven om een reeks van windsnelheden te simuleren. Voor deze thesis is gekozen voor het **model op basis van de gemiddelde wind-snelheid**. Dit model levert reeds voldoende nauwkeurige resultaten en is behoorlijk eenvoudig om te implementeren. Om het geheugen op te frissen, worden de componenten van dit model nog eens kort herhaald:

- de gemiddelde windsnelheid
- tijdsvariaties in de gemiddelde windsnelheid
- windvlagen
- turbulentie

In het Matlabscript zijn deze verschillende componenten dan ook aanwezig en de verschillende parameters kunnen gevarieerd worden om het gewenste windsignaal te bekomen. De opbouw wordt hieronder kort toegelicht.

Algemene parameters

Bij de algemene parameters kan de tijdsduur t_{eind} van het gewenste windsignaal worden ingesteld. Bovendien kan ook het aantal datapunten per seconde worden gekozen. Standaard is een tijdsduur van 200s ingesteld met 10 discrete windsnelheden per seconde.

De gemiddelde windsnelheid

Ter bepaling van de gemiddelde windsnelheid $v_{\rm g}$ dienen volgende parameters gekozen te worden:

- v_{gemmax} is de maximaal gewenste gemiddelde windsnelheid [m/s]
- v_{gemmin} is de minimaal gewenste gemiddelde windsnelheid [m/s]

Wanneer de Matlabfile uitgevoerd wordt, zal een willekeurige gemiddelde windsnelheid gelegen tussen bovenstaande grenzen gegenereerd worden door middel van (4.1):

$$v_{\rm g} = rand(1) \cdot (v_{\rm gemmax} - v_{\rm gemmin}) + v_{\rm gemmin} \tag{4.1}$$

De functie rand(1) stelt hierbij een willekeurig getal tussen 0 en 1 voor dat door de computer wordt gegenereerd. Bij deze berekende gemiddelde windsnelheid kunnen nu de andere componenten van het windmodel opgeteld worden.

Tijdsvariaties in de gemiddelde windsnelheid

Om de tijdsvariaties in de gemiddelde windsnelheid te karakteriseren volstaan volgende parameters:

- A_{hmax} stelt de maximaal gewenste toename of afname in windsnelheid [m/s] voor
- D_{hmax} stelt de maximaal gewenste duur van de toename of afname in windsnelheid [s] voor
- $n_{\rm h}$ stelt het gewenste aantal tijdsvariaties in de windsnelheid voor

Aangezien er $n_{\rm h}$ variaties in de windsnelheid gemodelleerd dienen te worden, wordt een for-lus $n_{\rm h}$ keer doorlopen. Het eindresultaat is een windsnelheid $v_{\rm h}$ die de trage variaties in de windsnelheid bevat. De beginconditie van $v_{\rm h}$ is nul. In deze for-lus worden volgende berekeningen uitgevoerd.

$$A_{\rm h} = 2 \cdot \left(rand(1) - \frac{1}{2} \right) \cdot A_{\rm hmax} \tag{4.2}$$

$$T_{\rm eh} = rand(1) \cdot t_{\rm eind} \tag{4.3}$$

$$T_{\rm sh} = T_{\rm eh} - rand(1) \cdot D_{\rm hmax} \tag{4.4}$$

$$v_{\rm h} = v_{\rm h} + A_{\rm h} \cdot (t - T_{\rm sh}) \cdot \mathcal{H} (t - T_{\rm sh}) - A_{\rm h} \cdot (t - T_{\rm eh}) \cdot \mathcal{H} (t - T_{\rm eh})$$
(4.5)

Eerst wordt de grootte van de toe- of afname A_h in windsnelheid berekend. De waarde van A_h ligt tussen $-A_{hmax}$ en A_{hmax} zoals uit (4.2) blijkt. Vervolgens worden start- en eindmoment T_{sh} en T_{eh} van de verandering in windsnelheid bepaald. Deze dienen binnen het gesimuleerde tijdsinterval te liggen en de duur mag niet langer zijn dan D_{hmax} . Het exacte begintijdstip en eindtijdstip worden volledig door het toeval bepaald, wat blijkt uit het gebruik van de functie rand(1). Tot slot wordt het bekomen snelheidsprofiel opgeteld bij het snelheidsprofiel bekomen uit de vorige iteratie van de for-lus. $\mathcal{H}(...)$ stelt hierbij de Heaviside-functie voor. Na n_h iteraties bevat v_h alle variaties in de gemiddelde windsnelheid.

Windvlagen

De derde component in het windmodel zijn de windvlagen die kunnen optreden. Om deze te modelleren dient men over volgende gegevens te beschikken:

- A_{vmax} is de maximaal gewenste amplitude van de windvlaag [m/s]
- D_{vmin} is de minimaal gewenste duur van de windvlaag [s]
- $n_{\rm v}$ is het gewenste aantal windvlagen

Nu moeten er n_v windvlagen gesimuleerd worden, daarvoor wordt een for-lus n_v keer doorlopen. Het resultaat van deze berekening is een windsnelheid v_w die alle windvlagen bevat. De beginwaarde van v_w is nul. In de for-lus worden achtereenvolgens onderstaande berekeningen uitgevoerd.

$$A_{\rm v} = 2 \cdot \left(rand(1) - \frac{1}{2} \right) \cdot A_{\rm vmax} \tag{4.6}$$

$$T_{\rm ev} = rand(1) \cdot t_{\rm eind} \tag{4.7}$$

$$T_{\rm sv} = T_{\rm ev} - rand(1) \cdot D_{\rm vmin} \tag{4.8}$$

$$D_{\rm v} = T_{\rm ev} - T_{\rm sv} \tag{4.9}$$

$$v_{\rm w} = v_{\rm w} + \begin{cases} 0 & als \ t \le T_{\rm sv} \\ A_{\rm v} \left(1 - \cos\left(2\pi (t/D_{\rm v} - T_{\rm sv}/D_{\rm v})\right) & als \ T_{\rm sv} \le t \le T_{\rm ev} \\ 0 & als \ t \ge T_{\rm ev} \end{cases}$$
(4.10)

In elke iteratie wordt de amplitude A_v van de windvlaag berekend. Deze kan zowel positief als negatief zijn en neemt een waarde aan tussen $-A_{vmax}$ en A_{vmax} . Daarna worden start- en eindmoment T_{sv} en T_{ev} van de windvlaag bepaald, waaruit de duur D_v berekend kan worden. Net zoals bij de variaties in de windsnelheid moeten start- en eindmoment binnen het gesimuleerde tijdsinterval liggen. De ligging wordt ook nu weer door het toeval bepaald. Aan het eind van elke iteratie wordt de berekende windvlaag bij v_w opgeteld. Na n_v iteraties bevat v_w alle windvlagen die men in het uiteindelijke windprofiel wenst.

Turbulentie

De laatste component van het beschouwde windmodel is turbulentie. Deze component is de oorzaak van de behoorlijk lange rekentijd die nodig is om een volledige reeks van windsnelheden te simuleren. Volgende gegevens dienen gekend te zijn om de turbulente component uit te kunnen rekenen.

- z_0 is de ruwheidslengte [m] te vinden in Tabel 3.2
- z_2 is de hoogte van de gondel boven de grond [m]
- $L = 20 \cdot z_2$ is de turbulentieschaal [m]
- f_{max} is de gewenste maximale frequentiecomponent van de turbulentie [Hz]

Bij het berekenen van de turbulentie wordt een *for*-lus 10.000 keer doorlopen. Deze waarde bleek een goede trade-off te zijn tussen snelheid en nauwkeurigheid van de berekeningen. Als eindresultaat krijgt men de snelheidscomponent v_t waarvan de beginwaarde gelijk is aan nul. De bewerkingen uit de lus staan hieronder opgelijst.

$$\delta = \frac{f_{\text{max}}}{10.000} \tag{4.11}$$

$$f = \left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot \delta \tag{4.12}$$

$$S = \frac{\frac{1}{\ln(z_2/z_0)^2} \cdot L \cdot v_{\rm g}}{\left(1 + 1, 5\frac{f \cdot L}{v_{\rm g}}\right)^{5/3}} \tag{4.13}$$

$$\phi = rand(1) \cdot 2\pi \tag{4.14}$$

$$A = \sqrt{\frac{1}{2}S\delta \cdot \sin(\phi)} \tag{4.15}$$

$$B = \sqrt{\frac{1}{2}S\delta \cdot \cos(\phi)} \tag{4.16}$$

$$v_{\rm t} = v_{\rm t} + 2(A\sin(2\pi f \cdot t) + B\cos(2\pi f \cdot t))$$
(4.17)

In de eerste stap wordt de stapgrootte δ tussen twee opeenvolgende frequenties f berekend. Vervolgens wordt de frequentie f waarvan de turbulentie-intensiteit zal berekend worden bepaald. Aan de hand van deze frequentie f kan de grootte van het spectrum S uitgerekend worden. De waarde van de fasehoek ϕ wordt willekeurig in het interval $[0..2\pi]$ gekozen. Nu zijn we in staat de amplitudes A en B te berekenen die de turbulente component bij de frequentie f bepalen. In de laatste stap wordt de huidige turbulente component opgeteld bij deze uit de vorige iteratie. Nadat alle iteraties uitgevoerd zijn, bevat de variabele v_t de volledige turbulente inhoud van het uiteindelijke windsnelheidsprofiel.

De totale windsnelheid

Nu alle afzonderlijke componenten van het windmodel bepaald zijn, kan de uiteindelijke windsnelheid berekend worden door de verschillende componenten bij elkaar op te tellen zoals formule (4.18) suggereert:

$$v = \begin{cases} v_{\rm g} + v_{\rm h} + v_{\rm w} + v_{\rm t} & \text{als } v_{\rm g} + v_{\rm h} + v_{\rm w} + v_{\rm t} \ge 0\\ 0 & \text{als } v_{\rm g} + v_{\rm h} + v_{\rm w} + v_{\rm t} < 0 \end{cases}$$
(4.18)

Hieruit blijkt bovendien dat enkel positieve windsnelheden toegelaten worden. Aangezien de variaties in de windsnelheid en de windvlagen negatieve amplitudes kunnen hebben om afnames in de windsnelheid toe te laten, is het mogelijk dat er door cumulatie blijvend negatieve windsnelheden optreden in het gesimuleerde tijdsinterval. Een korte negatieve windsnelheid zou in werkelijkheid nog kunnen optreden (ten gevolge van bv. een hevige 'negatieve' windstoot), maar blijvende negatieve windsnelheden wijzen eenvoudigweg op een gewijzigde windrichting. Een werkelijke windturbine zal door de vaanmechanismen opnieuw in de wind gebracht worden, waardoor de negatieve windsnelheid vanzelf verdwijnt. Blijvend negatieve windsnelheden zijn dus in werkelijkheid niet mogelijk. Aangezien er bij dit eenvoudige windturbinemodel geen rekening wordt gehouden met de windrichting (deze wordt loodrecht op de rotor verondersteld), wordt er dus best voor gezorgd dat er geen negatieve windsnelheden optreden in het windmodel. Het Matlabscript genereert aan het einde van de simulatie automatisch een grafiek waarin de berekende windsnelheid getoond wordt. Op deze manier kan de correcte werking van het model nagegaan worden. Bovendien wordt de berekende reeks windsnelheden weggeschreven in een bestand dat makkelijk kan ingelezen worden door Simulink.

4.2.4 Windtypes

Tot nog toe werd het windmodel zeer algemeen gekarakteriseerd aan de hand van verschillende parameters. In dit gedeelte worden vier duidelijk onderscheiden windtypes gedefinieerd die doorheen deze thesis gebruikt zullen worden. Voor alle windtypes werd gebruik gemaakt van het **model op basis van de gemiddelde windsnelheid**. Bovendien werd voor elk van deze windtypes een apart Matlabscript gemaakt waarin de keuze van de parameters reeds gemaakt werd. Op deze manier is het mogelijk om snel een nieuwe reeks winddata van een bepaald windtype te genereren. Deze bestanden zijn te vinden in Bijlage A.

Zwakke, licht variërende wind

Het windtype Zwakke, licht variërende wind wordt gekenmerkt door de afwezigheid van turbulentie. De gemiddelde windsnelheid is bovendien laag en de fluctuaties in de windsnelheid zijn traag. Volgende parameters kenmerken dit type wind:

- lage gemiddelde snelheid: $\bar{v} \leq 5 \,\mathrm{m/s}$
- variaties in de gemiddelde snelheid waarvoor geldt:

$$\begin{cases} |A_{\rm h}| \leq \frac{1}{40} \,\mathrm{m/s} \\ T_{\rm eh} - T_{\rm sh} \leq 30 \,\mathrm{s} \end{cases}$$

• windvlagen waarvoor geldt:

$$\begin{cases} |A_{\rm v}| \le 0, 2\,{\rm m/s} \\ D_{\rm v} \ge 20\,{\rm s} \end{cases}$$

• geen turbulentie

Een voorbeeld van dit windtype is te zien in Figuur 4.3.



Figuur 4.3: Zwakke, licht variërende wind.

Matige, turbulente wind

Bij het windtype *Matige, turbulente wind* is de gemiddelde windsnelheid iets hoger, doch er zijn weinig trage fluctuaties. De wind is wel turbulent. Dit type wind wordt gekarakteriseerd door volgende parameters:

- matige gemiddelde snelheid: $5 \text{ m/s} \le \bar{v} \le 7 \text{ m/s}$
- variaties in de gemiddelde snelheid waarvoor geldt:

$$\begin{cases} |A_{\rm h}| \leq \frac{1}{160} \,\mathrm{m/s} \\ T_{\rm eh} - T_{\rm sh} \leq 30 \,\mathrm{s} \end{cases}$$

• windvlagen waarvoor geldt:

$$\begin{cases} |A_{\rm v}| \le 0,05\,{\rm m/s}\\ D_{\rm v} \ge 40\,{\rm s} \end{cases}$$

• turbulentie met volgende parameters:

$$\begin{cases} z_0 = 0, 5 \,\mathrm{m} \\ z_2 = 15 \,\mathrm{m} \\ L = 300 \,\mathrm{m} \\ f_{\mathrm{max}} = 1, 5 \,\mathrm{Hz} \end{cases}$$

Een voorbeeld van dit windtype is te zien in Figuur 4.4.

Krachtige wind met hevige fluctuaties

Het windtype *Krachtige wind met hevige fluctuaties* heeft een hoge gemiddelde windsnelheid. Er treden grote snelheidswijzigingen op, maar de turbulentie is eerder beperkt. Volgende parameters werden gebruikt om dit windtype te simuleren:



Figuur 4.4: Matige, turbulente wind.

- hoge gemiddelde snelheid: $7 \text{ m/s} \le \bar{v} \le 10 \text{ m/s}$
- variaties in de gemiddelde snelheid waarvoor geldt:

$$\begin{cases} |A_{\rm h}| \leq \frac{5}{40} \,\mathrm{m/s} \\ T_{\rm eh} - T_{\rm sh} \leq 30 \,\mathrm{s} \end{cases}$$

• windvlagen waarvoor geldt:

$$\begin{cases} |A_{\rm v}| \le 1,5\,{\rm m/s}\\ D_{\rm v} \ge 20\,{\rm s} \end{cases}$$

• turbulentie met volgende parameters:

$$\begin{cases} z_0 = 0,0001 \,\mathrm{m} \\ z_2 = 15 \,\mathrm{m} \\ L = 300 \,\mathrm{m} \\ f_{\mathrm{max}} = 1 \,\mathrm{Hz} \end{cases}$$

Een voorbeeld van dit windtype is te zien in Figuur 4.5.

Storm

Bij *Storm* is de gemiddelde snelheid zeer hoog. Er zijn zowel hevige snelheidsveranderingen als rukwinden, ook de turbulentie is zeer hoog. Om het windtype 'Storm' te karakteriseren werden deze parameters gebruikt:

- zeer hoge gemiddelde snelheid: $10\,\mathrm{m/s}\,\leq\bar{v}\leq13\,\mathrm{m/s}$
- variaties in de gemiddelde snelheid waarvoor geldt:

$$\begin{cases} |A_{\rm h}| \leq \frac{6}{40} \,\mathrm{m/s} \\ T_{\rm eh} - T_{\rm sh} \leq 30 \,\mathrm{s} \end{cases}$$

• windvlagen waarvoor geldt:

$$\begin{cases} |A_{\rm v}| \le 2\,{\rm m/s} \\ D_{\rm v} \ge 20\,{\rm s} \end{cases}$$



Figuur 4.5: Krachtige wind met hevige fluctuaties.

• turbulentie met volgende parameters:

$$\begin{cases} z_0 = 1 \text{ m} \\ z_2 = 15 \text{ m} \\ L = 300 \text{ m} \\ f_{\text{max}} = 2 \text{ Hz} \end{cases}$$

Een voorbeeld van dit windtype is te zien in Figuur 4.6.



Figuur 4.6: Storm.

4.3 Turbinemodel

4.3.1 Keuze van het turbinemodel

Bij het turbinemodel is er een keuze uit twee mogelijkheden:

- Blade element theory op basis van een 3D-windveld
- eenvoudig model op basis van één windsnelheid op gondelhoogte

Uit het voorgaande is onmiddellijk duidelijk dat er wordt gekozen voor het model op basis van één windsnelheid op gondelhoogte. De methode voor het modelleren van een turbine wordt uitgebreid beschreven in Hoofdstuk 3.

4.3.2 Ontwerp van de turbinerotor

Wanneer er wordt besloten om een windturbine te bouwen, dienen er vooraf enkele keuzes gemaakt te worden. Een eerste belangrijke keuze is de plaats waar de turbine ingeplant wordt. Deze plaats zal immers bepalen hoe hoog de gemiddelde windsnelheid is. In Figuur 4.7¹ is een kaart te zien waarop de gemiddelde windsnelheid op verschillende plaatsen in Europa weergegeven wordt . Hieruit blijkt onmiddellijk het grote belang van een goede plaatskeuze. Vooraleer overgegaan wordt tot het bouwen van een turbine is het dus aangewezen eerst metingen uit te voeren ter bepaling van de gemiddelde windsnelheid.

Een tweede belangrijke keuze is het nominaal vermogen van de turbine. Er dient beslist te worden hoeveel elektriciteit men wenst op te wekken met de windturbine. Deze keuze is natuurlijk gedeeltelijk afhankelijk van de plaats waar de windturbine wordt ingeplant. Hierbij is men vaak gebonden aan een bepaalde regelgeving zodat er gekozen dient te worden tussen kleine, middelgrote of grote windturbines.

De bepalende gegevens bij de bouw van een windturbine zijn dus de gemiddelde windsnelheid op de voorziene gondelhoogte en het nominaal vermogen van de turbine. Vertrekkende van deze gegevens zullen dan de afmetingen van de turbine bepaald worden (o.a. gondelhoogte, rotordiameter, ...). Met deze afmetingen van de turbine correspondeert dan een bepaalde nominale assnelheid die de keuze van het type generator (en eventuele tandwielkast) mede zal beïnvloeden. Hier wordt er echter omgekeerd tewerk gegaan. Er wordt eerst een generator gekozen. Uit de nominale assnelheid en het nominale vermogen van deze generator worden dan de afmetingen van de turbine bepaald. Ook de gemiddelde windsnelheid horende bij dit nominale vermogen wordt hieruit berekend. De benodigde gegevens, zijnde nominaal vermogen en nominale assnelheid, van de generator die in de emulatoropstelling gebruikt wordt (Mecc Alte, Eogen 60/16) zijn hieronder vermeld.

- $P_{\text{nom}} = 1 \,\text{kW}$
- $n_{\rm nom} = 415 \, {\rm tpm}$

Er moet een keuze gemaakt worden uit de verschillende vermogenscoëfficiënten $C_{\rm p}(\lambda, \theta)$ die in Hoofdstuk 3 vermeld zijn. Er wordt gekozen voor onderstaande vermogenscoëfficiënt.

$$C_{\rm p}(\lambda,\theta) = 0,73 \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0,58\theta - 0,002\theta^{2,14} - 13,2\right) \exp\left(-\frac{18,4}{\lambda_i}\right)$$
(4.19)

waarbij

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0.02\,\theta} - \frac{0.003}{\theta^3 + 1}} \tag{4.20}$$

¹Bron: http://www.wind-energie.be/windkaarten.php



Figuur 4.7: Windkaart van Europa.

In bovenstaande vergelijkingen kan θ gelijk aan nul gesteld worden aangezien er een kleine windturbine wordt gesimuleerd. Deze turbines beschikken in de meeste gevallen niet over een actieve controle van de stelhoek, waardoor deze nul kan worden verondersteld. Onderstaande uitdrukking voor de vermogenscoëfficiënt wordt verkregen.

$$C_{\rm p}(\lambda,\theta) = 0,73 \left(\frac{151}{\lambda} - 13,653\right) \exp\left(-\frac{18,4}{\lambda} + 0,0552\right)$$
(4.21)

Nu de vermogenscoëfficient $C_{\rm p}(\lambda)$ bepaald is, kan er overgegaan worden tot het bepalen van de rotorafmetingen. Bij een assnelheid van 415 tpm is een asvermogen van 1 kW gewenst. Hierbij wordt de capaciteit van de windturbine ten volle benut. Het maximum van de vermogenscoëfficiënt, $C_{\rm pmax}$, en de bijhorende snellopendheid, $\lambda_{\rm max}$ moeten dus bepaald worden. Hiervoor wordt $C_{\rm p}(\lambda)$ afgeleid naar λ en gelijkgesteld aan nul:

$$\frac{\mathrm{d}C_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}\lambda} = 0 \tag{4.22}$$

Dit geeft volgende resultaten:

$$\lambda_{\max} = 6,9077$$
$$C_{p_{\max}} = 0,4412$$

Uit de definitie van het asvermogen en de snellopendheid λ kan de windsnelheid v_{nom} horend bij het nominaal vermogen berekend worden.

$$P_{\rm nom} = \frac{1}{2} C_{\rm p_{max}} \, \rho \, \pi \, r^2 \, v^3 \tag{4.23}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{r \cdot \omega_{\text{nom}}}{v_{\text{nom}}} \tag{4.24}$$

Zo wordt volgende uitdrukking voor de windsnelheid v_{nom} bekomen:

$$v_{\rm nom} = \sqrt[5]{\frac{P_{\rm nom} \cdot 2 \cdot \omega_{\rm nom}^2}{\rho \cdot \pi \cdot \lambda_{max}^2 \cdot C_{\rm p_{max}}}}$$
(4.25)

Voor de assnelheid ω_{nom} geldt:

$$\omega_{\rm nom} = \frac{2\pi \cdot n_{\rm nom}}{60} = \frac{83}{6}\pi \, \rm rad/s \tag{4.26}$$

Aangezien alle waarden van formule 4.25 gekend zijn, volgt voor v_{nom} :

$$v_{\rm nom} = 8,585 \,{\rm m/s}$$

Dit is een aanvaardbare waarde voor de windsnelheid die bij nominale assnelheid het nominale vermogen levert, al is het wel aan de lage kant. Aangezien het hier over een kleine windturbine gaat en de windsnelheid op lagere hoogte toch lager is, hoeft dit geen probleem te zijn. Bovendien is het mogelijk om de generator gedurende korte periodes te overbelasten zonder dat dit tot schade leidt. Er kan nu overgegaan worden tot het bepalen van de rotorstraal van de turbine.

$$r = \frac{\lambda_{\max} \cdot v_{\text{nom}}}{\omega_{\text{nom}}} = 1,365\,\text{m} \tag{4.27}$$

Om de inertie van de turbine bij benadering te kunnen berekenen, dient de massa van de rotor gekend te zijn. Om toch een enigzins realistische waarde voor deze massa te bekomen, wordt gebruik gemaakt van onderstaande gegevens over Fortis turbines (zie Tabel 4.1). De

	Passaat	Montana	Alizé
Vermogen [kW]	1,4	5,0	13,0
Rotorstraal [m]	1,6	2,5	3,5
Massa blad [kg]	2,0	9,6	20,0
Massa rotor [kg]	11,8	30,0	70,0
Rotorinertie [kgm ²]	2,11	18,75	81,67

Tabel 4.1: Gegevens Fortis turbines.

rotormassa wordt uitgezet in functie van het vermogen zoals te zien in Figuur 4.8. Door middel van extrapolatie wordt onderstaande rotormassa bekomen voor een turbine met een vermogen van 1 kW.

$$m_{\rm rotor} = 10 \, \rm kg$$

Gebruikmakende van de formule uit Hoofdstuk 3 is het mogelijk om de inertie van de turbine te bepalen.

$$J_{\rm t} = \frac{1}{9}m_{\rm rotor}r^2 = \frac{1}{9} \cdot 10\,{\rm kg} \cdot (1,365\,{\rm m})^2 = 2,07{\rm kgm}^2$$

Nu de rotorstraal en de turbine-inertie bepaald zijn, is de turbinerotor gekarakteriseerd.



Figuur 4.8: Rotormassa in functie van het vermogen.

4.3.3 Implementatie in Simulink



Figuur 4.9: Turbinemodel in Simulink.

De implementatie van het turbinemodel in Simulink is te zien in Figuur 4.9. Het turbinemodel heeft twee ingangsvariabelen: het generatorkoppel $T_{\rm g}$ en de windsnelheid v. De snelheid v is afkomstig van het windmodel. Het generatorkoppel is een uitgang van het generatormodel. Daarnaast telt het turbinemodel nog zes uitgangsvariabelen. De enige uitgangsvariabele die als ingang dient voor een ander deelmodel is de mechanische hoek $\theta_{\rm m}$, die in het generatormodel ingelezen wordt. De andere variabelen worden naar buiten gebracht om weer te kunnen geven als grafieken in het overzichtsscherm van het volledige windturbinemodel. De declaratie van de verschillende parameters gebeurt in het bijhorende initialisatiebestand in Matlab. Om de bespreking van het model overzichtelijk te houden, worden de verschillende deelblokken apart behandeld. De volgorde waarin deze besproken worden, houdt geenzins verband met de volgorde waarin de berekeningen uitgevoerd worden. Het is immers zo dat de berekeningen sterk met elkaar gekoppeld zijn en iteratief dienen opgelost te worden.

Berekening van de snellopendheid λ

Om de snellopendheid λ te berekenen wordt onderstaande formule geïmplementeerd in Simulink.

$$\lambda = \frac{r \cdot \omega_{\rm m}}{v} \tag{4.28}$$

waarbij r de rotorstraal is. In Figuur 4.10 is dit trouwens onmiddellijk zichtbaar.



Figuur 4.10: Berekening van λ in Simulink.

Berekening van de vermogenscoëfficiënt $C_{\rm p}$

In het blokje *Calculation* $C_{\rm p}$ (zie Figuur 4.11) wordt de reeds vermelde vermogenscoëfficiënt $C_{\rm p}(\lambda,\theta)$ uitgerekend (zie (4.19)). De stelhoek θ is hier nog steeds behouden, zodat het mogelijk is om toch een turbine met variabele stelhoek te simuleren.



Figuur 4.11: Berekening van C_p in Simulink.

Berekening van de windsnelheid v

Uit de berekeningen van het windmodel volgt er reeds een windsnelheid v. Hierbij zijn de invloeden van torenschaduw en windschering echter nog niet in rekening gebracht. Omdat deze invloeden sterk afhankelijk zijn van de bouw van de turbine worden deze in het turbinemodel berekend. Het blokje *TowershadowWindshear* dat hiervoor verantwoordelijk is, staat weergegeven in Figuur 4.12. Dit blokje doet niets anders dan de onderstaande formules continu uitrekenen



Figuur 4.12: Berekening van v in Simulink.

voor de windsnelheid afkomstig van het windmodel:

$$m = \left[1 + \frac{\alpha(\alpha - 1)(r^2)}{8h^2}\right]$$
(4.29)
$$\left(m_{\rm P} \left[-\frac{a^2}{8h^2} + \frac{(r^2 \sin^2(\theta_{\rm P}) + 1)}{2a^2r^2}\right]$$
(4.29)

$$v_{\rm eq_{ts}} = \begin{cases} \frac{mv_{\rm h}}{3r^2} \left[\frac{u}{\sin^2(\theta_{\rm m})} \ln \left(\frac{r-\sin^2(\theta_{\rm m})}{x^2} + 1 \right) - \frac{2u}{r^2\sin^2(\theta_{\rm m}) + x^2} \right] & \text{als } \frac{2\pi}{3} \le \theta_{\rm m} \le \frac{4\pi}{3} \\ \frac{mv_{\rm h}}{3r^2} \left[\frac{a^2}{\sin^2(\theta_{\rm m} + 2\pi/3)} \ln \left(\frac{r^2\sin^2(\theta_{\rm m} + 2\pi/3)}{x^2} + 1 \right) - \frac{2a^2r^2}{r^2\sin^2(\theta_{\rm m} + 2\pi/3) + x^2} \right] & \text{als } 0 \le \theta_{\rm m} \le \frac{2\pi}{3} \\ \frac{mv_{\rm h}}{3r^2} \left[\frac{a^2}{\sin^2(\theta_{\rm m} + 4\pi/3)} \ln \left(\frac{r^2\sin^2(\theta_{\rm m} + 4\pi/3)}{x^2} + 1 \right) - \frac{2a^2r^2}{r^2\sin^2(\theta_{\rm m} + 4\pi/3) + x^2} \right] & \text{als } \frac{4\pi}{3} \le \theta_{\rm m} \le 2\pi \end{cases}$$

$$(4.30)$$

$$v_{\rm eq_{ws}} = v_{\rm h} \left[\frac{\alpha(\alpha-1)}{8} \frac{r^2}{h^2} + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{60} \frac{r^3}{h^3} \cos(3\theta_1) \right]$$
(4.31)

$$v = v_{\rm h} + v_{\rm eq_{ts}} + v_{\rm eq_{ws}} \tag{4.32}$$

waarbij a de straal is van de toren, x de afstand van de turbine tot het centrum van de toren, h de hoogte van gondel boven de grond. Het resultaat is de windsnelheid v waarin de invloeden van windschering en torenschaduw reeds vervat zitten. Met deze windsnelheid kan nu het turbinekoppel bepaald worden.

Berekening van de assnelheid $\omega_{\rm m}$

De assnelheid $\omega_{\rm m}$ wordt berekend uit de bewegingsvergelijking van het geheel turbine + generator (4.33).

$$T_{\rm t} - T_{\rm g} = J_{\rm tot} \frac{\mathrm{d}\omega_{\rm m}}{\mathrm{d}t} \tag{4.33}$$

$$J_{\rm tot} = J_{\rm t} + J_{\rm g} \tag{4.34}$$

waarbij $T_{\rm t}$ het turbinekoppel is, $T_{\rm g}$ het generatorkoppel, $J_{\rm tot}$ de totale inertie, $J_{\rm t}$ de turbineinertie en $J_{\rm g}$ de generatorinertie. In Figuur 4.13 is de versterkingsfactor K te zien die gelijk is aan $1/J_{\rm tot}$. Het blokje waarin 1/s staat, stelt een integratie voor. Het geheel stelt dus de implementatie voor van onderstaande vergelijking:

$$\omega_{\rm m} = \int \frac{(T_{\rm t} - T_{\rm g})}{J_{\rm tot}} dt$$
(4.35)



Figuur 4.13: Berekening van $\omega_{\rm m}$ in Simulink.



Figuur 4.14: Berekening van T_t in Simulink.

Berekening van het turbinekoppel $T_{\rm t}$

Een zeer belangrijk blokje in het turbinemodel is de berekening van het turbinekoppel T_t . Uit Figuur 4.14 volgt onmiddellijk dat deze blok de rechtstreekse implementatie van de reeds vermelde formule voor het turbinekoppel is:

$$T_{\rm t} = \frac{C_{\rm p}(\lambda,\theta)\,\rho\,\pi\,r^2\,v^3}{2\omega_{\rm m}} \tag{4.36}$$

Berekening van de mechanische hoek $\theta_{\rm m}$

In Figuur 4.15 staat de berekening van de mechanische hoek θ_m in Simulink afgebeeld. Om de mechanische hoek θ_m uit de assnelheid ω_m te berekenen, dient ω_m geïntegreerd te worden.

$$\theta_{\rm m} = \int \omega_{\rm m} \mathrm{d}t \tag{4.37}$$

Berekening van het turbinevermogen $P_{\rm t}$

Tot slot wordt ook nog de berekening van het turbinevermogen $P_{\rm t}$ meegegeven in Figuur 4.16. Het wordt onmiddellijk duidelijk dat men het turbinevermogen kan bekomen op volgende manier:

$$P_{\rm t} = T_{\rm t} \cdot \omega_{\rm m} \tag{4.38}$$



Figuur 4.15: Berekening van $\theta_{\rm m}$ in Simulink.



Figuur 4.16: Berekening van $P_{\rm t}$ in Simulink.

Besluit

Zoals blijkt uit de bespreking van de Simulink-implementatie bestaat het turbinemodel uit een aantal (vaak zeer eenvoudige) deelmodellen. Er wordt bewust gekozen om het turbinemodel op te bouwen uit verschillende deelmodellen omdat op deze manier eenvoudig wijzigingen kunnen aangebracht worden (bv. verandering van vermogenscoëfficiënt,...). Bovendien blijft op deze manier het inzicht in de werking van de windturbine behouden.

4.3.4 Turbinetypes

Net zoals voor het windmodel worden er enkele turbinetypes gedefinieerd die later in de thesis kunnen worden aangewend. Het is interessant om verschillende types te hebben, zodat de invloed van bepaalde effecten beter onderzocht kan worden of net kan worden weggelaten. In combinatie met de verschillende windtypes, is er nu een grote keuze aan combinatiemogelijkheden.

Turbine Eenvoud

Het turbinetype *Turbine Eenvoud* is de meest eenvoudige vorm, want er wordt geen rekening gehouden met windschering of het toreneffect. Er wordt gebruik gemaakt van de vermogenscoëfficiënt uit formule (3.33):

$$C_{\rm p}(\lambda) = 0,73 \left(\frac{151}{\lambda} - 13,65\right) \exp\left(\frac{-18,4}{\lambda} + 0,055\right)$$

De turbine heeft volgende afmetingen:

- rotorstraal $r = 1,365 \,\mathrm{m}$
- rotormassa $m_{\rm rotor} = 10 \, \rm kg$
- turbine-inertie $J_t = 2,07 \, \mathrm{kgm}^2$

Turbine Torenschaduw

Het type Turbine Torenschaduw is iets geavanceerder, daar ook rekening wordt gehouden met torenschaduw. Als $C_{\rm p}(\lambda)$ wordt opnieuw formule (3.33) toegepast. De windmolen heeft volgende afmetingen:

- rotorstraal $r = 1,365 \,\mathrm{m}$
- rotormassa $m_{\rm rotor} = 10 \, \rm kg$
- turbine-inertie $J_{\rm t} = 2,07 \, \rm kgm^2$
- hoogte van de gondel boven de grond $h = 15 \,\mathrm{m}$
- straal van de toren a = 0, 15 m
- longitudinale afstand van het blad tot de as van de toren $x = 0, 45 \,\mathrm{m}$

Turbine Compleet

Bij *Turbine Compleet* worden alle effecten in rekening gebracht. Zowel torenschaduw als windschering komen aan bod. De vermogenscoëfficiënt is opnieuw dezelfde als bij vorige turbinetypes.

- rotorstraal $r = 1,365 \,\mathrm{m}$
- rotormassa $m_{\rm rotor} = 10 \, \rm kg$
- turbine-inertie $J_t = 2,07 \, \mathrm{kgm}^2$
- hoogte van de gondel boven de grond $h = 15 \,\mathrm{m}$
- straal van de toren $a = 0, 15 \,\mathrm{m}$
- longitudinale afstand van het blad tot de as van de toren $x = 0, 45 \,\mathrm{m}$
- de windscheringsexponent α dient correct gevarieerd te worden afhankelijk van de ondergrond. Indien het niet expliciet anders wordt vermeld, wordt $\alpha = 0,25$ aangenomen.

4.4 Generatormodel

4.4.1 Algemeen

Het generatormodel simuleert een veelpolige synchrone generator met permanente magneten. De vergelijkingen die voor dit model van toepassing zijn, zijn terug te vinden in Hoofdstuk 3. Het generatormodel werd ter beschikking gesteld bij het begin van de thesis. Om een kwalitatieve vergelijking toe te laten tussen de metingen afkomstig van de emulatoropstelling en de resultaten van het simulatiemodel, is het aangewezen om de parameters van het simulatiemodel zo nauwkeurig mogelijk te laten aansluiten op de generator gebruikt in de emulator. Eerst zal de implementatie van de generator in Simulink beschreven worden. Vervolgens wordt een overzicht gegeven van de parameters van de generator die experimenteel bepaald werden.



Figuur 4.17: Generatormodel in Simulink.

4.4.2 Implementatie in Simulink

In Figuur 4.17 is de implementatie van het generatormodel te zien. Het generatormodel heeft twee ingangsvariabelen en vijf uitgangsvariabelen. De ene ingangsvariabele is een matrix die de drie sterspanningen $[V_{\rm a}, V_{\rm b}, V_{\rm c}]$ bevat, de andere ingangsvariabele is de mechanische hoek $\theta_{\rm m}$. De sterspanningen worden bepaald door het lastmodel, de mechanische hoek is afkomstig van het turbinemodel. Van de vijf uitgangsvariabelen worden er slechts twee naar een ander deelmodel doorgekoppeld: het generatorkoppel $T_{\rm g}$, dat wordt ingelezen in het turbinemodel, en de fasestromen $[I_{\rm a}, I_{\rm b}, I_{\rm c}]$, die naar het lastmodel gaan.

Uit de mechanische hoek $\theta_{\rm m}$ wordt de elektrische hoek $\theta_{\rm e}$ berekend mits het aantal poolparen $N_{\rm p}$ gekend is:

$$\theta_{\rm e} = N_{\rm p} \cdot \theta_{\rm m} \tag{4.39}$$

Na afleiding wordt hieruit dan onmiddellijk de elektrische snelheid $\omega_{\rm e}$ bekomen:

$$\omega_{\rm e} = \frac{\mathrm{d}\theta_{\rm e}}{\mathrm{d}t} \tag{4.40}$$

Met de kennis van de elektrische hoek $\theta_{\rm e}$ is het nu mogelijk om over te gaan op een referentiestelsel dat meedraait met de rotor, het zogenaamde synchroon referentiestelsel. Daarvoor worden achtereenvolgens Clarke- en Park-transformatie toegepast op de fasespanningen $[V_{\rm a}, V_{\rm b}, V_{\rm c}]$ zodat de spanningen $[V_{\rm q}, V_{\rm d}]$ in het dq-stelsel verkregen worden.

• Clarke transformatie

$$V_{\alpha} = \frac{2}{3} \left(V_{\rm a} - \frac{1}{2} V_{\rm b} - \frac{1}{2} V_{\rm c} \right)$$
$$V_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(V_{\rm b} - V_{\rm c} \right)$$
(4.41)

• Park transformatie

$$V_{\rm q} = V_{\alpha} \cos(\theta_{\rm e}) + V_{\beta} \sin(\theta_{\rm e})$$

$$V_{\rm d} = -V_{\alpha} \sin(\theta_{\rm e}) + V_{\beta} \cos(\theta_{\rm e})$$
(4.42)

De permanente magneten worden gemodelleerd als driefasige sinusoïdale fluxbronnen bij rotatie.

$$\Psi_{\rm PM_a} = -\Psi_{\rm PM} \sin\left(\theta_{\rm e}\right)$$

$$\Psi_{\rm PM_b} = -\Psi_{\rm PM} \sin\left(\theta_{\rm e} - \frac{2\pi N_{\rm p}}{3}\right)$$

$$\Psi_{\rm PM_c} = -\Psi_{\rm PM} \sin\left(\theta_{\rm e} - \frac{4\pi N_{\rm p}}{3}\right)$$
(4.43)

Door gebruik te maken van de Clarke- en Park-transformatie kunnen deze fluxen omgezet worden in een d- en q-as magneetflux $[\Psi_{\rm PM_q}, \Psi_{\rm PM_d}]$. Afleiden van de bovenstaande fluxen geeft respectievelijk de poolradspanningen $[E_{\rm PM_a}, E_{\rm PM_b}, E_{\rm PM_c}]$ en $[E_{\rm PM_q}, E_{\rm PM_d}]$. In het blokje *Current Calculation* worden uitgaande van de fasespanningen en de poolradspanningen de stromen $[I_q, I_d]$ en de spanningen $[E_q, E_d]$ berekend door middel van onderstaande vergelijkingen:

$$V_{\rm q} = R_{\rm s}I_{\rm q} + sL_{\rm q}I_{\rm q} + E_{\rm PMq} - \omega_{\rm e}L_{\rm d}I_{\rm d} \tag{4.44}$$

$$V_{\rm d} = R_{\rm s}I_{\rm d} + sL_{\rm d}I_{\rm d} + E_{\rm PMd} + \omega_{\rm e}L_{\rm q}I_{\rm q} \tag{4.45}$$

Gebruik makend van de vergelijkingen (4.46) en (4.47) worden de d- en q-as flux berekend.

$$\Psi_{q} = L_{q}I_{q} + \Psi_{PMq} \tag{4.46}$$

$$\Psi_{\rm d} = L_{\rm d} I_{\rm d} + \Psi_{\rm PMd} \tag{4.47}$$

In het blokje Power & Efficiency worden het mechanisch vermogen $P_{\rm m}$, het elektrisch vermogen $P_{\rm e}$, het statorverliesvermogen $P_{\rm sj}$ en het rendement $\eta_{\rm g}$ uitgerekend.

$$P_{\rm m} = -\frac{3}{2} \left(E_{\rm q} I_{\rm q} + E_{\rm d} I_{\rm d} \right) \tag{4.48}$$

$$P_{\rm sj} = \frac{3}{2} R_{\rm s} \left(I_{\rm q}^{\ 2} + I_{\rm d}^{\ 2} \right) \tag{4.49}$$

$$P_{\rm e} = P_{\rm m} - P_{\rm sj} \tag{4.50}$$

$$\eta_{\rm g} = \frac{P_{\rm e}}{P_{\rm m}} \tag{4.51}$$

Vervolgens kan het generatorkoppel $T_{\rm g}$ bepaald worden met (4.52).

$$T_{\rm g} = \frac{P_{\rm m} \cdot N_{\rm p}}{\omega_{\rm e}} \tag{4.52}$$

Tot slot worden de d- en q-as grootheden $[I_q, I_d]$, $[E_q, E_d]$ en $[E_{PM_q}, E_{PM_d}]$ door middel van de inverse Clarke- en Park-transformaties omgerekend naar de fasegrootheden $[I_a, I_b, I_c]$, $[E_a, E_b, E_c]$ en $[E_{PM_a}, E_{PM_b}, E_{PM_c}]$.

• inverse Park transformatie

$$X_{\alpha} = X_{q} \cos(\theta_{e}) - X_{d} \sin(\theta_{e})$$

$$X_{\beta} = X_{q} \sin(\theta_{e}) + X_{d} \cos(\theta_{e})$$
(4.53)

• inverse Clarke transformatie

$$X_{a} = X_{\alpha}$$

$$X_{b} = -\frac{1}{2}X_{\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}X_{\beta}$$

$$X_{c} = -\frac{1}{2}X_{\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2}X_{\beta}$$

$$(4.54)$$

In het bovenstaande model wordt er gebruik gemaakt van verschillende constanten die generatorgebonden zijn. In de volgende paragraaf zullen deze constanten bepaald worden voor de generator uit de emulatoropstelling.

4.4.3 Bepaling van de generatorparameters

Zoals reeds vermeld is de generator een veelpolige synchrone generator met permanente magneten: Mecc Alte, Eogen 60/16. Uit de kenplaatgegevens kan de generatorinertie en het aantal poolparen bepaald worden:

• aantal poolparen $N_{\rm p}$

$$N_{\rm p} = \frac{f_{\rm nom} \cdot 60}{n_{\rm nom}} = \frac{55 \cdot 60}{415} = 8 \tag{4.55}$$

• $J_{\rm g} = 0,0815\,{\rm kgm^2}$

Bepaling van de statorweerstand en inductanties

Aangezien de generator beschikt over een bereikbaar sterpunt, kunnen de weerstand en inductantie per fase gemeten worden. Hiervoor wordt er gebruik gemaakt van een LCR-meter. De metingen gebeuren bij een frequentie van 50 Hz en een spanning van 1 V. Om een nauwkeurige positiebepaling mogelijk te maken, wordt er gebruik gemaakt van de absolute encoder die op de inductiemotor voorzien is. Om de 10 ° wordt er een meting van de weerstand en inductantie van elke fase uitgevoerd. Aangezien er echter een tandwielkast met overbrengingsverhouding n = 3,49 tussen de inductiemotor en de generator aanwezig is, komt 1 omwenteling van de inductiemotor dus 1 omwenteling afgelegd. Zoals echter blijkt uit de meetresultaten is een voldoende nauwkeurige bepaling van de statorweerstand $R_{\rm s}$ en inductanties $L_{\rm q}$ en $L_{\rm d}$ reeds mogelijk met deze gegevens.

De statorweerstand $R_{\rm s}$ wordt bepaald als het gemiddelde van de statorweerstanden van de verschillende fasen. De statorweerstand per fase wordt dan weer bepaald als het gemiddelde over de 36 weerstandsmetingen. Dit levert volgende waarde voor $R_{\rm s}$ op:

$$R_{\rm s} = \frac{R_{\rm sa} + R_{\rm sb} + R_{\rm sc}}{3} = \frac{13,562\,\Omega + 13,405\,\Omega + 13,448\,\Omega}{3} = 13,472\,\Omega$$

De resultaten van de inductantiemetingen staan weergeven in Figuur 4.18. Op deze figuur is



Figuur 4.18: Inductantie per fase.

onmiddellijk het reluctantie-effect in de inductantie zichtbaar. Aangezien het generatormodel gebruik maakt van de twee-assige voorstelling in het synchroon referentiestelsel, dienen de d- en q-as inductantie bepaald te worden. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de formules uit [27]:

$$L_{\rm d} = L_{\rm s} - M_{\rm s} + 3/2 \, L_{\rm s2} \tag{4.56}$$

$$L_{\rm q} = L_{\rm s} - M_{\rm s} - 3/2 \, L_{\rm s2} \tag{4.57}$$

De inductanties $L_{\rm d}$ en $L_{\rm q}$ kunnen dus berekend worden indien de zelfinductantie $L_{\rm s}$, de mutuele inductantie $M_{\rm s}$ en de reluctantiecomponent $L_{\rm s2}$ gekend zijn. Indien de spreidingsinducantie $L_{\rm s\sigma}$ verwaarloosd wordt, geldt er volgens [27–30] voor de zelfinductanties:

$$L_{\rm sa} = L_{\rm s} - L_{\rm s2} \cos \left(2\theta\right)$$

$$L_{\rm sb} = L_{\rm s} - L_{\rm s2} \cos \left(2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right)$$

$$L_{\rm sc} = L_{\rm s} - L_{\rm s2} \cos \left(2\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right)\right)$$
(4.58)

Voor de mutuele inductanties geldt er volgens [27]:

$$M_{\rm sab} = M_{\rm sba} = M_{\rm s} - L_{\rm s2} \cos\left(2\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right)\right)$$
$$M_{\rm sac} = M_{\rm sca} = M_{\rm s} - L_{\rm s2} \cos\left(2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right)$$
$$M_{\rm sbc} = M_{\rm scb} = M_{\rm s} - L_{\rm s2} \cos\left(2\left(\theta - \frac{3\pi}{3}\right)\right)$$
(4.59)

Terwijl er volgens [28], [29] en [30] geldt:

$$M_{\rm sab} = M_{\rm sba} = -\frac{1}{2}L_{\rm s} - L_{\rm s2}\cos\left(2\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right)\right)$$
$$M_{\rm sac} = M_{\rm sca} = -\frac{1}{2}L_{\rm s} - L_{\rm s2}\cos\left(2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right)$$
$$M_{\rm sbc} = M_{\rm scb} = -\frac{1}{2}L_{\rm s} - L_{\rm s2}\cos\left(2\left(\theta - \frac{3\pi}{3}\right)\right)$$
(4.60)

Identificatie van beide uitdrukkingen levert ons:

$$M_{\rm s} = -\frac{1}{2}L_{\rm s} \tag{4.61}$$

Bij de inductantiemetingen worden de uitdrukkingen (4.58) opgemeten, zij het op een arbitraire hoek γ en een andere coëfficïent voor θ na. Aan de meetdata worden met behulp van Matlab de best passende sinuskrommes gefit zodat voor elke fase een uitdrukking voor de zelfinductantie bekomen wordt, waaruit de waarden voor $L_{\rm s}$, $L_{\rm s2}$ en bijgevolg ook $M_{\rm s}$ kunnen bepaald worden.

$$\begin{split} L_{\rm sa} &= 119, 7+51, 39 \sin{(4,576\,\theta+0,2371)} \ {\rm mH} \\ L_{\rm sb} &= 120, 6+51, 41 \sin{(4,552\,\theta-1,8)} \ {\rm mH} \\ L_{\rm sc} &= 119, 9+51, 68 \sin{(4,586\,\theta+2,262)} \ {\rm mH} \end{split}$$

Dat de veronderstelling van een perfect sinusvormig verloop inderdaad voldoende correct is, blijkt uit de gedetailleerde metingen van de inductanties voor een volledige poolsteek (zie Figuur 4.19). Nu wordt er om de 30' van de absolute encoder een meting uitgevoerd, wat overeenstemt met een generatorhoek van 8'36". Opnieuw worden sinuskrommen gefit aan de metingen. In Figuur 4.19 is te zien dat de metingen en gefitte curves zeer dicht bij elkaar liggen. Er is echter wel een lichte afplatting van de sinusvorm te zien, wat het gevolg kan zijn van een derde harmonische (indien de gefitte sinus als grondgolf wordt beschouwd). Uit de fourierontbinding volgt inderdaad dat de derde harmonische de belangrijkste harmonische component in het inductantieverloop is. De amplitude van deze derde harmonische bedraagt ongeveer 2,5% van de amplitude van de grondgolf. Het is dus zeker geoorloofd om deze invloed te verwaarlozen en het inductantieverloop als sinusvormig te beschouwen.



Figuur 4.19: Inductantie per fase (detail).

De waarden voor $L_{\rm s}, M_{\rm s}$ en $L_{\rm s2}$ worden opnieuw bepaald als het gemiddelde voor de drie fasen:

$$\begin{split} L_{\rm s} &= \frac{119,7\,{\rm mH} + 120,6\,{\rm mH} + 119,9\,{\rm mH}}{3} = 120,07\,{\rm mH} \\ M_{\rm s} &= -\frac{1}{2}120,07\,{\rm mH} = -60,03\,{\rm mH} \\ L_{\rm s2} &= \frac{51,39\,{\rm mH} + 51,41\,{\rm mH} + 51,68\,{\rm mH}}{2} = 51,49\,{\rm mH} \end{split}$$

Met (4.56) en (4.57) worden de d- en q-as inductanties uit het generatormodel bepaald:

$$L_{\rm d} = L_{\rm s} - M_{\rm s} + 3/2 L_{\rm s2} = 120,07 \,\text{mH} + 60,03 \,\text{mH} + \frac{3}{2}51,49 \,\text{mH} = 257,34 \,\text{mH}$$
$$L_{\rm q} = L_{\rm s} - M_{\rm s} - 3/2 L_{\rm s2} = 120,07 \,\text{mH} + 60,03 \,\text{mH} - \frac{3}{2}51,49 \,\text{mH} = 102,87 \,\text{mH}$$

Bepaling van de flux van de permanente magneten

Tot slot dient nog de amplitude van de flux van de permanente magneten Ψ_{PM} bepaald te worden (zie (4.43)). Daarvoor wordt de openklem sterspanning van de verschillende fasen gemeten bij variabele snelheid. Het verband tussen de fasespanning en de gekoppelde flux met deze fase is immers gekend:

$$\underline{V}_{a} = -\frac{\mathrm{d}\underline{\Psi}_{\mathrm{PM}_{a}}}{\mathrm{d}t} \tag{4.62}$$

De spanning die aan de klemmen gemeten wordt is de RMS-waarde, zodat hiermee rekening moet gehouden worden bij het bepalen van de amplitude $\Psi_{\rm PM}$. Volgende formules worden toegepast op de verschillende meetwaarden van de spanning bij variërende assnelheid $\omega_{\rm m}$:

$$V_{\rm rms} = \frac{V_{\rm a_{rms}} + V_{\rm b_{rms}} + V_{\rm c_{rms}}}{3}$$

$$\Psi_{\rm PM_{rms}} = \frac{V_{\rm rms}}{\omega_{\rm m} \cdot N_{\rm p}}$$

$$\Psi_{\rm PM} = \Psi_{\rm PM_{rms}} \cdot \sqrt{2}$$
(4.63)

Volgende waarde voor $\Psi_{\rm PM}$ wordt gevonden uit de metingen:

$$\Psi_{\rm PM} = 1,188 \, {\rm Wb}$$

De verschillende parameters van het generatormodel zijn nu bepaald zodat een maximale overeenkomst tussen de generator uit de emulatoropstelling en het simulatiemodel kan verwacht worden. De parameters van het generatormodel worden ook gedeclareerd in de initialisatiefile, zodat het eenvoudig is om deze te wijzigen indien nodig. De bovenstaande manier om de parameters te bepalen kan op een andere generator toegepast worden om deze met het model te kunnen simuleren.

4.5 Lastmodel

Het laatste deelmodel van het simulatiemodel is het model dat een variabele weerstandslast simuleert. Er worden twee verschillende types van lastmodel geïmplementeerd. Het ene model simuleert een constante weerstand die vooraf in het initialisatiebestand gekozen wordt, het andere model beschikt over een regeling die de snellopendheid λ naar een wenswaarde regelt door de weerstand R te variëren. Het tweede model is handig indien er een sterk variabele windsnelheid wordt gebruikt en er geen geldig werkingspunt meer dreigt te bestaan bij een constante lastweerstand. De ingangen van het lastmodel zijn de fasestromen $[I_a, I_b, I_c]$ terwijl de spanningen $[V_a, V_b, V_c]$ de uitgangen zijn van het model. Voor de regeling van λ vormt dit nog een extra ingang van het model.

4.5.1 Eenvoudig lastmodel

In het eenvoudig lastmodel wordt een constante weerstand gesimuleerd uitgaande van volgende vergelijkingen:

$$V_{a} = R \cdot I_{a}$$

$$V_{b} = R \cdot I_{b}$$

$$V_{c} = R \cdot I_{c}$$
(4.64)

4.5.2 Lastmodel met regeling van λ

In Figuur 4.20 is de implementatie van het lastmodel met regeling van λ in Simulink te zien. Naast het blokje *Loadcalculation* waarin de vergelijkingen (4.64) worden berekend, beschikt het



Figuur 4.20: Het lastmodel in Simulink.

model nu over een PI-regelaar. Deze PI-regelaar zorgt ervoor dat de wenswaarde λ_w van de

snellopendheid λ zo goed mogelijk bereikt wordt. Hiervoor wordt de weerstand R aangepast zodat uiteindelijk het generatorkoppel beïnvloed wordt. De startwaarde voor de weerstand is nog steeds de weerstandswaarde opgegeven in het initialisatiebestand. De PI-regelaar voegt hier het variabele gedeelte bij. Een slimme keuze van de startweerstand zal natuurlijk het bereiken van het gewenste werkingspunt bevorderen. Om de PI-regelaar af te stellen wordt gebruik gemaakt van de methode beschreven in [31].

- 1. De windturbine wordt gesimuleerd bij een constante windsnelheid v. De versterkingsfactor van de integrerende werking $K_{\rm I}$ wordt op nul gesteld. De versterkingsfactor van de proportionele regelaar $K_{\rm P}$ wordt verhoogd totdat er oscillatie van λ optreedt bij de instelling van het werkingspunt.
- 2. Op het moment dat er oscillatie van λ optreedt, wordt de waarde van $K_{\rm P}$ gedeeld door twee.
- 3. De factor $K_{\rm I}$ wordt vervolgens verhoogd tot er opnieuw oscillatie van λ optreedt. $K_{\rm I}$ wordt gedeeld door twee.
- 4. De werking van het systeem wordt gecontroleerd.

Gebruikmakend van bovenstaande werkwijze worden volgende waarden voor $K_{\rm P}$ en $K_{\rm I}$ verkregen:

$$K_{\rm P} = 41$$
$$K_{\rm I} = 40$$

Dit levert een vlotte werking van de weerstandsregeling, ook bij sterk variabele windsnelheden.

4.6 Verificatie

Nu het model volledig opgesteld is, is het van belang om de correcte werking ervan te verifiëren. In deze paragraaf wordt aan de hand van enkele simulaties en berekeningen de juistheid van het simulatiemodel aangetoond.

4.6.1 Doorlopen van de $C_{\rm p}(\lambda)$ -curve

Het is zeer belangrijk dat de geprogrammeerde $C_{\rm p}$ -curve ook effectief doorlopen wordt bij een variërende snellopendheid λ . Om dit te testen is een sterk variabele windsnelheid nodig, er wordt gekozen voor een reeks winddata van het type *Storm*. De windturbine is in werking op het moment dat de storm optreedt en wel met een startsnelheid van 287 tpm. De lastweerstand op dat ogenblik bedraagt 100 Ω . De automatische weerstandsregeling is ingeschakeld en zal proberen λ naar de optimale waarde van 6,9 te regelen. Deze omstandigheden zijn ideaal om de volledige $C_{\rm p}$ -curve te doorlopen, aangezien de wind zo sterk varieert dat de regeling niet in staat is de weerstand snel genoeg aan de wisselende windsnelheden aan te passen. In Figuur 4.21 is het resultaat van de simulatie te zien. Indien dit resultaat vergeleken wordt met de overeenkomstige curve uit Figuur 3.11, is onmiddellijk de goede overeenkomst tussen beide curven zichtbaar. Er kan dus geconcludeerd worden dat de gewenste vermogenscoëfficiënt inderdaad correct doorlopen wordt.


Figuur 4.21: $C_{\rm p}(\lambda)$ -curve volgend uit het simulatiemodel.

4.6.2 Controle van het ingestelde werkingspunt

Een tweede controle op de correcte werking van het model, is nagaan of het werkingspunt dat een simulatie suggereert effectief overeenkomt met het verwachte werkingspunt. Het is echter quasi onmogelijk om intuïtief in te zien wat het werkingspunt zal zijn. De grootte van de lastweerstand R bepaalt de relatie tussen de stromen en de spanningen en beïnvloedt het generatorkoppel. Bij sommige weerstandswaarden zal er dus helemaal geen mogelijkheid zijn om turbinekoppel en generatorkoppel in evenwicht te brengen. Daarom is het van belang een gesloten uitdrukking te vinden die het generatorkoppel T_g uitdrukt in functie van de weerstand R en de assnelheid ω_m . De uitdrukking voor het turbinekoppel T_t is reeds gekend uit 4.36. Indien er nu een waarde wordt gekozen voor de lastweerstand R en de windsnelheid v zijn beide koppels enkel functie van de assnelheid. Het is dus mogelijk om deze uit te zetten in functie van de assnelheid en grafisch het werkingspunt te bepalen. Ook een numerieke oplossing (bv. m.b.v. Matlab) behoort tot de mogelijkheden. Om de gesloten uitdrukking van T_g in functie van de lastweerstand niet al te complex te maken, wordt het reluctantie-effect buiten beschouwing gelaten. De berekeningen van het generatorkoppel vertrekken van het vervangschema uit Figuur 4.22, zie [32, 33]. De



Figuur 4.22: Het vereenvoudigd vervangschema van de generator.

uitdrukking voor het generatorkoppel luidt nu:

$$T_{\rm g} = \frac{3}{\omega_{\rm m}} \Re (\underline{E}_{\rm p} \cdot \underline{I}^*)$$
(4.65)

Verder gelden volgende verbanden:

$$\underline{E}_{\mathbf{p}} = \omega_{\mathbf{e}} \cdot \underline{\Psi}_{\mathbf{p}} \tag{4.66}$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{E}_{\mathrm{p}}}{R_{\mathrm{r}} + R + iX_{\mathrm{r}}} \tag{4.67}$$

$$X_{\rm s} = \omega_{\rm e} \cdot L_{\rm s} \tag{4.68}$$

$$\omega_{\rm e} = N_{\rm p} \cdot \omega_{\rm m} \tag{4.69}$$

Worden bovenstaande verbanden in de uitdrukking voor het turbinekoppel gesubstitueerd, dan vindt men na enig rekenwerk:

$$T_{\rm g} = 3N_{\rm p}^{\ 2}\Psi_{\rm p}^{\ 2}\omega_{\rm m}\frac{R_{\rm s} + R}{(R_{\rm s} + R)^2 + (\omega_{\rm m}N_{\rm p}L_s)^2}$$
(4.70)

De statorweerstand $R_{\rm s}$ is deze die in het Simulink-model gebruikt wordt. Als synchrone inductantie $L_{\rm s}$ wordt het gemiddelde van de d-as inductantie $L_{\rm d}$ en de q-as inductantie $L_{\rm q}$ genomen. Dit geeft de beste resultaten. In Figuur 4.23 zijn $T_{\rm g}$ en $T_{\rm t}$ weergegeven in functie van de assnelheid $\omega_{\rm m}$. Er wordt een constante windsnelheid $v = 8,585 \,\mathrm{m/s}$ ingesteld en een lastweerstand R van 200 Ω . Het rechtse snijpunt van generatorkoppel en turbinekoppel geeft een stabiel wer-



Figuur 4.23: Turbinekoppel (- -) en generatorkoppel (--) in functie van de assnelheid.

kingspunt weer. Indien de assnelheid ten gevolge van een kleine verstoring licht toeneemt, stijgt het generatorkoppel terwijl het turbinekoppel daalt. Aangezien het generatorkoppel hoger is dan het turbinekoppel zal de assnelheid opnieuw afnemen zodat de koppels weer in evenwicht komen. Neemt de assnelheid daarentegen licht af ten gevolge van een verstoring, dan wordt het turbinekoppel groter dan het generatorkoppel. De assnelheid zal nu toenemen om weer een koppelevenwicht te verkrijgen. Het rechtse snijpunt is dus duidelijk een stabiel werkingspunt. Wordt bovenstaande redenering toegepast op het linkse snijpunt dan wordt onmiddellijk duidelijk dat dit geen stabiel werkingspunt oplevert. Het werkingspunt treedt op bij een assnelheid van 42,9 rad/s en een koppel van 23,3 Nm. Vervolgens worden dezelfde instellingen voor windsnelheid en lastweerstand gebruikt bij een simulatie. De startwaarde van de assnelheid is gelijk aan de nominale snelheid van 415 tpm. Als turbinetype wordt *Turbine Eenvoud* gekozen. Het verloop van het generatorkoppel, het turbinekoppel en de assnelheid zijn weergegeven in Figuur 4.24. Na het uitsterven van het overgangsverschijnsel wordt een assnelheid van ongeveer 39,9 rad/s bereikt bij een koppel van 24,49 Nm. Bij de simulatieresultaten van het generatorkoppel werd het reluctantiekoppel eruit gefilterd om het koppel aanschouwelijk te kunnen voorstellen. Enkel



Figuur 4.24: Generatorkoppel, turbinekoppel en assnelheid uit het simulatiemodel.

het uitgemiddeld generatorkoppel wordt weergegeven op de figuur. In werkelijkheid is er op dit gemiddeld koppel een sinusvormige oscillatie met een pulsatie gelijk aan het dubbele van de elektrische pulsatie ω_e aanwezig. De piek-tot-piek waarde van deze oscillatie bedraagt 18,1 Nm. De oscillatie van het koppel is het gevolg van het reluctantie-effect. Het is dit reluctantie-effect dat er ook voor zorgt dat het gesimuleerde generatorkoppel hoger is dan het berekende generatorkoppel, waar er geen rekening wordt gehouden met het reluctantiekoppel. De assnelheid is dus iets lager in de simulatie door het hogere generatorkoppel. Beide werkingspunten liggen echter zeer dicht bij elkaar.

Zoals blijkt uit Figuur 4.25 en Figuur 4.26 ligt het berekende werkingspunt ook voor andere keuzes van de windsnelheid en lastweerstand zeer dicht bij het gesimuleerde werkingspunt. In Figuur 4.25 is het generatorkoppel voor verschillende windsnelheden en belastingen weergeven. Figuur 4.26 geeft de assnelheid bij deze werkingspunten weer. De overeenkomst tussen de eenvoudige berekening en de simulatie is duidelijk. Bij zwaardere belasting wordt het verschil tussen de berekening en de simulatie iets groter, wat te wijten is aan het reluctantiekoppel, maar de afwijking blijft klein. De controle van het werkingspunt doet dus vermoeden dat het simulatiemodel correct functioneert.



Figuur 4.25: Generatorkoppel $T_{\rm g}$ bij verschillende belastingen. X= berekening, O= simulatie.



Figuur 4.26: Assnelheid ω_m bij verschillende belastingen. X = berekening, O = simulatie.

4.6.3 Illustratie van torenschaduw en windschering

Om de invloed van torenschaduw en windschering na te gaan, wordt de simulatie uit de vorige paragraaf herhaald, zij het nu met een ander turbinetype. De windsnelheid is opnieuw constant en gelijk aan 8,585 m/s. De startsnelheid is gelijk aan de nominale waarde, 415 tpm. Het gekozen turbinetype is *Turbine Compleet*. In Figuur 4.27 worden generatorkoppel, turbinekoppel en assnelheid weergegeven. Niet enkel het generatorkoppel vertoont nu een periodieke variatie (ten



Figuur 4.27: Generatorkoppel, turbinekoppel en assnelheid uit het simulatiemodel bij torenschaduw en windschering.

gevolge van het reluctantie-effect), maar ook het turbinekoppel (ten gevolge van torenschaduw en windschering). Om een overzichtelijke weergave van deze koppels te verkrijgen, werd opnieuw enkel het gemiddeld koppel getoond. Het generatorkoppel vertoont een sinusvormige oscillatie met een pulsatie gelijk aan het dubbele van de elektrische pulsatie ω_e en een piek-tot-piek waarde van 17,6 Nm. Het turbinekoppel vertoont een dip van ongeveer 2,33 Nm met een pulsatie van drie keer de assnelheid. Iedere keer wanneer een turbineblad voorbij de toren passeert, is er immers een dip in het turbinekoppel. Gemiddeld gezien is het turbinekoppel dus gedaald ten opzichte van de 'ideale' situatie zonder toren. Een lager regimekoppel is dus te verwachten. Dit blijkt ook uit de simulaties: een werkingspunt bij een assnelheid van 39,3 rad/s en een koppel van 23,5 Nm wordt ingesteld. Om de periodische dip in het turbinekoppel duidelijk te maken, is een deel van Figuur 4.27 uitvergroot weergegeven in Figuur 4.28. Een eenvoudige berekening van de



Figuur 4.28: Detailweergave van het turbinekoppel.

frequentie waaraan de dips optreden toont onmiddellijk aan dat er per omwenteling inderdaad drie koppeldalingen zijn bij het passeren van de toren. Uit de figuur halen we de gegevens nodig voor de volgende berekening:

$$\omega_{\rm dip} = 2\pi \frac{9}{19,925\,{\rm s} - 19,45\,{\rm s}} \approx 119,04\,{\rm rad/s} \tag{4.71}$$

dips per omwenteling =
$$\frac{\omega_{\rm dip}}{\omega_{\rm m}} = \frac{119,04 \,\mathrm{rad/s}}{39,3 \,\mathrm{rad/s}} \approx 3,03$$
 (4.72)

De implementatie van torenschaduw en windschering lijkt dus goed te werken.

4.6.4 Besluit

Uit de bovenstaande controles blijkt dat het simulatiemodel voldoet aan de vereisten. De gewenste vermogenscoëfficiënt wordt correct doorlopen, het verwachte werkingspunt wordt ingesteld en de invloeden van torenschaduw en windschering zijn correct opgenomen.

Hoofdstuk 5

Windturbine-emulator

5.1 Algemeen

De opbouw van de windturbine-emulator is te zien in de schematische voorstelling in Figuur 5.1. De inductiemotor wordt aangestuurd zodat het gedrag van een windturbine nagebootst wordt.



Figuur 5.1: Schematische voorstelling windturbine-emulator.

Tussen de inductiemotor en de generator is een tandwielkast aanwezig. Bij deze veelpolige generator is de tandwielkast in een werkelijke windturbine niet noodzakelijk. Er wordt daarom gekozen om de tandwielkast als een deel van de geëmuleerde turbinerotor te beschouwen. Bij de sturing van de inductiemotor zal hier dan ook rekening mee gehouden worden. Afgaand op Figuur 5.1 kan gesteld worden dat alle onderdelen links van de koppeling zullen instaan voor het nabootsen van de turbinerotor. Deze zijn dan ook niet terug te vinden in een echte windturbine. Alles rechts van de koppeling is wel aanwezig in een windturbine (waarbij de weerstandslast in werkelijkheid vervangen wordt door een omvormer gekoppeld aan het net). De analogie met het simulatiemodel valt onmiddellijk op. Het geheel van sturing, omvormer, inductiemotor en tandwielkast wordt in het simulatiemodel behandeld door het windmodel en turbinemodel. Het generatormodel en het lastmodel behandelen de generator en de variabele weerstand. In de volgende paragrafen zal de opbouw en werking van de experimentele opstelling uiteengezet worden. De inhoud van dit hoofdstuk wordt ook beschreven in [34].

5.2 Experimentele opstelling

De experimentele opstelling wordt hier besproken. Eerst wordt er nagegaan hoe de turbineinertie correct door de inductiemotor kan nagebootst worden. Vervolgens wordt de invloed van de tandwielkast onderzocht en een model wordt opgesteld. Tot slot worden de verschillende onderdelen van de experimentele opstelling besproken.

5.2.1 Emuleren van de turbine-inertie

Om de windturbine na te bootsen zal het koppel van de inductiemotor gestuurd worden. Bij een constante regimesnelheid zal het volstaan om de motor het berekende turbinekoppel te laten leveren. Bij veranderingen van de assnelheid is er echter een verschil in het gedrag van de turbine en de motor. De inertie van de turbine is veel groter dan deze van de motor, waardoor er een inertiecompensatiekoppel zal moeten geleverd worden om het verschil in dynamica tussen de werkelijke turbine en de testopstelling op te vangen. In Figuur 5.2 staat de werkelijke situatie bij een veelpolige generator weergegeven. De bewegingsvergelijking luidt in dit geval:



Figuur 5.2: Werkelijke situatie.

$$T_{\rm t} - T_{\rm g} = J_{\rm tot_1} \frac{\mathrm{d}\omega_{\rm m}}{\mathrm{d}t} \tag{5.1}$$

$$J_{\text{tot}_1} = J_{\text{g}} + J_{\text{k}} + J_{\text{t}} \tag{5.2}$$

waarbij $J_{\rm g}$, $J_{\rm k}$ en $J_{\rm t}$ respectievelijk de inertie van de generator, koppeling en turbinerotor voorstellen. In de testopstelling geldt echter de situatie van Figuur 5.3.



Figuur 5.3: Situatie in de emulatoropstelling.

Door de aanwezigheid van de transmissiekast gelden volgende verbanden tussen de assnelheden

en koppels aangegeven op de figuur.

$$\frac{\omega_{\rm m}}{\omega_{\rm mot}} = \frac{N_{\rm m}}{N_{\rm v}} = \frac{1}{n} \tag{5.3}$$

$$\frac{T_{\rm v}}{T_{\rm m}} = \frac{N_{\rm v}}{N_{\rm m}} = n \tag{5.4}$$

waarbij $N_{\rm m}$ het aantal tanden op het tandwiel van de ingaande as en $N_{\rm v}$ het aantal tanden op het tandwiel van de uitgaande as is. De overbrengingsverhouding voor de tandwielkast wordt dus n = 3, 49. Bovendien kan de motorinertie $J_{\rm m}$ op de sneldraaiende motoras omgerekend worden naar een equivalente inertie $J_{\rm v}$ die aan de snelheid $\omega_{\rm m}$ van de generator draait.

$$J_{\rm v} = J_{\rm m} \left(\frac{N_{\rm v}}{N_{\rm m}}\right)^2 = n^2 J_{\rm m} \tag{5.5}$$

Zo bekomt men de equivalente situatie van Figuur 5.4 waarbij alle grootheden omgerekend zijn naar de generatoras.



Figuur 5.4: Equivalente situatie.

De bewegingsvergelijking neemt nu volgende vorm aan:

 $J_{\rm v}$

$$T_{\rm v} - T_{\rm g} = J_{\rm tot_2} \frac{\mathrm{d}\omega_{\rm m}}{\mathrm{d}t} \tag{5.6}$$

$$J_{\text{tot}_2} = J_{\text{g}} + J_{\text{k}} + J_{\text{v}} \tag{5.7}$$

Indien de vergelijkingen (5.1) en (5.6) van elkaar worden afgetrokken, krijgt men onderstaande vergelijking

$$T_{\rm t} - T_{\rm v} = (J_{\rm tot_1} - J_{\rm tot_2}) \frac{\mathrm{d}\omega_{\rm m}}{\mathrm{d}t}$$
(5.8)

$$= (J_{\rm t} - J_{\rm v}) \frac{\mathrm{d}\omega_{\rm m}}{\mathrm{d}t} \tag{5.9}$$

(5.10)

Deze vergelijking kan nu eenvoudig worden uitgewerkt naar de enige onbekende, zijnde het equivalente koppel $T_{\rm v}.$

$$T_{\rm v} = T_{\rm t} + (J_{\rm v} - J_{\rm t}) \,\frac{\mathrm{d}\omega_{\rm m}}{\mathrm{d}t} \tag{5.11}$$

$$=T_{\rm t}+T_{\rm in} \tag{5.12}$$

(5.13)

Met behulp van vergelijking (5.4) wordt de uitdrukking voor het motorkoppel bekomen.

$$T_{\rm m} = \frac{T_{\rm t} + T_{\rm in}}{n} \tag{5.14}$$

Uit (5.14) blijkt dat de motor enerzijds een koppel ten gevolge van de wind moet leveren en anderzijds een extra koppel moet leveren om overgangsverschijnselen juist te emuleren. Door de aanwezigheid van de transmissiekast , dienen deze koppels herschaald te worden met de overbrengingsverhouding. Aangezien het turbinekoppel $T_{\rm t}$ afhankelijk is van de assnelheid $\omega_{\rm m}$ en het inertiecompensatiekoppel $T_{\rm in}$ afhankelijk is van de versnelling van de as, zal een nauwkeurige snelheidsmeting van zeer groot belang zijn.

5.2.2 Compensatie van de tandwielkast

In de emulatoropstelling zijn er verschillende wrijvingsverliezen, onder andere in de lagers van de inductiemotor en generator, maar het grootste gedeelte treedt op in de tandwielkast. Als de inductiemotor nu een bepaald koppel levert, zal de generator een lager koppel ontvangen door het koppelverschil over de tandwielkast. Dit effect kan gecompenseerd worden door een tandwielkastcompensatiekoppel T_{tand} op te tellen bij het motorkoppel. Het koppelverschil ΔT tussen de in- en uitgaande as van de tandwielkast (waarbij het ingangskoppel omgerekend wordt naar een equivalent koppel gebruikmakende van vergelijking (5.4)) wordt beschreven door de onderstaande vergelijking:

$$\Delta T = J_{\text{tand}} \frac{\mathrm{d}^2 \theta_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t^2} + D_{\text{tand}} \frac{\mathrm{d}\theta_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t} + K_{\text{tand}} \theta_{\mathrm{m}}$$
(5.15)

met J_{tand} de inertie van de tandwielkast, D_{tand} de wrijvingscoëfficiënt en K_{tand} de torsieveerconstante. De veerconstante K_{tand} kan nul verondersteld worden bij het bestuderen van een tandwielkast. De inertie J_{tand} is bovendien heel klein in vergelijking met de turbine-inertie J_{t} waardoor de invloed op de dynamica van het systeem verwaarloosbaar is. Op deze manier wordt de uitdrukking voor het tandwielkastcompensatiekoppel:

$$T_{\text{tand}} = \Delta T \cong D_{\text{tand}} \frac{\mathrm{d}\theta_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t} = D_{\text{tand}}\omega_{\mathrm{m}}$$
 (5.16)

Het compensatiekoppel is dus een functie van de assnelheid $\omega_{\rm m}$. De wrijvingscoëfficiënt $D_{\rm tand}$ dient experimenteel bepaald te worden. Om dit te doen wordt er geen elektrische belasting met de generator verbonden. De inductiemotor wordt bij verschillende snelheden bedreven en het koppel om deze constante assnelheid te behouden, wordt gemeten. De resultaten van deze metingen zijn te zien in Figuur 5.5. Wordt er aan deze meetdata een lineaire curve gefit, dan wordt onderstaande vergelijking bekomen:

$$T_{\text{tand}} = 0,02843 \cdot \omega_{\text{m}} \tag{5.17}$$

De wrijvingscoëfficiënt $D_{\text{tand}} = 0,02843 \,\text{Nms/rad}$ is nu gekend, zodat het mogelijk is om het motorkoppel te berekenen. We zijn nu in staat om met dit koppel de turbine zo goed als mogelijk te simuleren:

$$T_{\rm m} = \frac{T_{\rm t} + T_{\rm in}}{n} + T_{\rm tand} \tag{5.18}$$

Bovenstaand motorkoppel $T_{\rm m}$ wordt in de DSP geprogrammeerd. De inductiemotor simuleert nu een windturbine waarbij het turbinekoppel $T_{\rm t}$, het inertiekoppel $T_{\rm in}$ en het tandwielkastcompensatiekoppel $T_{\rm tand}$ in rekening worden gebracht.



Figuur 5.5: Metingen van het tandwielkastcompensatiekoppel T_{tand} .

5.2.3 Inductiemotor en tandwielkast

De turbine wordt nagebootst door de inductiemotor. Aan deze motor is onmiddellijk een tandwielkast bevestigd om de snelheid van de inductiemotor te reduceren naar de generatorsnelheid. Bij de keuze van de motor zijn twee zaken van belang: het nominaal vermogen en het nominaal koppel. Het nominaal motorvermogen dient zeker hoger te zijn dan het vermogen van de generator van 1 kW. Het koppel dat beschikbaar is op de uitgaande as van de tandwielkast moet minstens 25 Nm bedragen. Beiden dienen hoger te zijn dan opgegeven waarden om een zekere overbelasting toe te laten. Ook bij dynamische verschijnselen (of extreme windcondities) dient de motor kortstondig een hoger vermogen of koppel te leveren. De keuze valt op een motor en bijhorende tandwielkast van het type **KEB G22A DL100L4** met onderstaande kenplaatgegevens:

- $P = 2,2 \, kW$
- T = 52 Nm
- n = 3,49
- $V(\Delta/Y) = 230/400 V$, f = 50 Hz, I = 8,3/4,8 A
- $\cos(\varphi) = 0.8$
- $N = 1415/405 \, tpm$
- $J_{\rm m} = 0,0045 \, \rm kgm^2$

De tandwielkast werd reeds meer in detail besproken, aangezien de verliezen ten gevolge van deze tandwielkast van belang zijn voor de wenswaarde van het koppel.

5.2.4 Vermogenomvormer

In de opstelling moet het koppel van de inductiemotor in grootte gestuurd worden. Er wordt dus gebruik gemaakt van een vermogenomvormer die beschikt over een koppelsturing in open kring, in dit geval een **Danfoss VLT AutomationDrive FC-302**. Hierdoor levert de inductiemotor ten alle tijde het gewenste koppel bij een variabele assnelheid. De wenswaarde van dit koppel

is afkomstig van de DSP en nageschakelde versterkerschakeling in de vorm van een analoge spanning tussen 0 V en 10 V. In de omvormer is het mogelijk om de gewenste koppelwaarden bij minimale spanning (0 V of hoger naar keuze) en maximale spanning (10 V of lager naar keuze) in te stellen. De tussenliggende waarden worden door lineaire interpolatie tussen deze beide grenswaarden bepaald (zie Figuur 5.6). Volgende referentiewaarden worden gekozen voor de



Figuur 5.6: Koppelwenswaarde $T_{\rm w}$ in functie van de analoge referentiespanning $V_{\rm an}$.

instelling van de omvormer:

- $V_{\text{ref,min}} = 0 \text{ V}$, $T_{\text{ref,min}} = 0 \text{ Nm}$
- $V_{\rm ref,max} = 10 \, \text{V}$, $T_{\rm ref,max} = 14,89 \, \text{Nm}$

De maximale referentiewaarde voor het koppel $T_{\rm ref,max}$ wordt bepaald door het maximale koppel van de inductiemotor, zijnde $52 \,\mathrm{Nm}/3,49 = 14,89 \,\mathrm{Nm}.$

Een handige functie van de vermogenomvormer is de automatische aanpassing van de motorgegevens (AMA). Bij het ingebruiknemen van de omvormer moeten eerst de kenplaatgegevens van de motor ingegeven worden om de omvormer toe te laten de sturing te verwezenlijken. Bij het uitvoeren van de AMA-functie bepaalt de omvormer de relevante motorparameters waardoor deze over het vervangschema van de inductiemotor beschikt. Zo is een nauwkeurige sturing van de motor mogelijk.

5.2.5 DSP + versterkerschakeling

De microcontroller **Delfino F28335** van **Texas Instruments** vormt het hart van de emulatoropstelling (Figuur 5.7). De berekening van de koppelwenswaarde en de communicatie met de encoder gebeurt hier. Om de DSP te kunnen programmeren wordt er gebruik gemaakt van de bijhorende **Experimenter Kit** die via een USB-kabel in verbinding staat met een computer. Het programma wordt geschreven in C. Hiervoor staat er software ter beschikking die het programma compileert en in de DSP programmeert: **Code Composer Studio**. Ook realtimecommunicatie met de DSP behoort tot de mogelijkheden zodat eenvoudig variabelen kunnen worden gevisualiseerd en aangepast.

Verder beschikt de DSP over een aantal programmeerbare pinnen. Eén zo'n pin wordt gebruikt als uitgang van een PWM-signaal. De amplitude van dit signaal bedraagt 3,3 V. Om dit signaal aan de analoge ingang van de vermogensomvormer aan te kunnen bieden, dient het drie maal versterkt te worden en gefilterd om deze PWM-spanning om te zetten in een gelijkspanning tussen 0 V en 10 V. Het ontwerp en de werking van deze versterker- en filterschakeling worden in detail uitgelegd in Bijlage B. Daarnaast worden nog twee andere pinnen gebruikt voor de



Figuur 5.7: Experimenter Kit met F28335.

communicatie met de absolute encoder. Eén pin is geconfigureerd als uitgang om een kloksignaal uit te zenden. De andere is een ingangspin waar het positiesignaal van de encoder door de DSP wordt ingelezen. Het principeschema staat weergegeven in Figuur 5.8.



Figuur 5.8: Principeschema DSP.

5.2.6 Absolute encoder

Voor het bepalen van het turbinekoppel is de assnelheid van de generator nodig. Om het compensatiekoppel te berekenen dient daarenboven ook nog de asversnelling gekend te zijn. Wordt het effect van torenschaduw en windschering toegevoegd, dan is kennis van de hoek van belang. Om aan al deze vereisten te voldoen, wordt er gebruik gemaakt van een absolute encoder die op de inductiemotor bevestigd wordt. De keuze valt op volgende encoder van de fabrikant Lika: Rotacod Absolute multi-turn encoder HSCT. De encoder heeft een resolutie van 8192 posities per omwenteling. Een voeding met een gelijkspanning tussen 10 V en 30 V dient voorzien te worden. Aangezien de vermogenomvormer over een 24 V spanningsuitgang beschikt, kan dit op deze manier geschieden. De communicatie van de encoder verloopt via het SSI-protocol waarbij de positie doorgestuurd wordt als een Gray-code. Zowel de datalijn als de kloklijn van de encoder zijn ontdubbeld omdat er gebruik gemaakt wordt van differentiële signalen om storende invloeden te beperken. Om het kloksignaal afkomstig van de DSP te ontdubbelen en het datasignaal van de encoder samen te voegen tot één signaal wordt er gebruik gemaakt van een tranceiver: MAX488 (zie Figuur 5.9). Deze dient gevoed te worden met een gelijkspanning van 5 V. Op deze manier is er communicatie mogelijk tussen de encoder en de DSP. Aangezien de DSP niet over een communicatiemodule voor SSI beschikt, zijn er verschillende functies geprogrammeerd om de communicatie toch toe te laten. Meer informatie over de communicatie tussen encoder en DSP is terug te vinden in Bijlage C.



Figuur 5.9: Principeschema encoder en tranceiver.

5.2.7 Generator

De kenplaatgegevens van de generator zijn reeds in Hoofdstuk 3 vermeld. Een belangrijke eigenschap van de generator is dat de buitenzijde draait. De permanente magneten zijn aan de binnenzijde van de rotor bevestigd. De statorwindingen zitten aan de binnenzijde van de generator zoals in Figuur 5.10 te zien is. De aansluitingen voor de drie fasen en het sterpunt



Figuur 5.10: Doorsnede van de generator.

komen uit de holle vaste as waarop de statorwindingen bevestigd zijn. Dit stelt bijzondere eisen aan de bevestiging van de generator. De vaste as wordt door middel van een klembus in de holte van een opstaande plaat geklemd. Aan de andere zijde van de generator wordt een flens met as bevestigd. Over deze as wordt een klauwkoppeling geschoven die de generator met de uitgaande as van de tandwielkast verbindt.

5.2.8 Variabele last

Er is keuze tussen twee types last, die hieronder kort beschreven worden. Bij de metingen wordt telkens vermeld welke last gebruikt wordt.

Gelijkrichter met schuifweerstand

Een tweede optie om de generator te belasten is gebruikmaken van een gelijkrichter die de driefasige generatorspanning gelijk richt. Aan de gelijkstroomzijde wordt een condensatorbank voorzien met een variabele schuifweerstand. Op deze manier kan ook een instelbare weerstand bekomen worden.

Programmeerbare driefasige last

De generator wordt belast met een programmeerbare driefasige last. Hiervoor wordt de **NHR 4600 AC Load** gebruikt. Deze wordt met een computer verbonden zodat het type belasting ingesteld kan worden. Er is keuze uit een constante stroomlast, constante spanningslast, weerstandslast, ... Hier wordt enkel gebruik gemaakt van de weerstandslast. Per fase kan de gewenste weerstand ingesteld worden. De last wordt in ster geschakeld, waarbij het sterpunt niet doorverbonden wordt.

5.3 DSP-sturing en opstart

5.3.1 DSP-sturing

In deze paragraaf wordt de werking van het DSP-programma toegelicht. Het programma bestaat uit drie grote delen: de main-functie en twee interrupts. De volledige code is terug te vinden in Bijlage D.

De main-functie

In de main-functie wordt de DSP klaargemaakt voor gebruik. Eerst wordt een basisinitialisatie van de processor uitgevoerd. Vervolgens worden de verschillende Gpio-pinnen geconfigureerd als ingang of uitgang. Ook de PWM-modules worden ingesteld voor gebruik. Tenslotte worden de gewenste interrupts geactiveerd en de timer opgestart. Aan het eind van de main-functie komt het programma in een oneindige *while*-lus terecht. In deze lus wordt geen enkele berekening uitgevoerd, enkel de *watchdog* wordt hier ingeschakeld om te voorkomen dat de DSP beschadigd geraakt indien het programma ongewenst vastloopt.

Interrupt 1: Koppelberekening

Deze interrupt onderbreekt de *while*-lus uit de main-functie om de 3,4 ms. Dit is de tijd die de encoder nodig heeft om tien positiemetingen uit te voeren. De koppelberekening vergt immers behoorlijk wat rekenkracht zodat het niet mogelijk is deze te frequent uit te voeren. Het resultaat van deze interrupt is een PWM-signaal dat via een uitgangspin naar de versterker- en filterschakeling wordt gestuurd. Het spanningsniveau na de filter is evenredig met het gewenste koppel. Hiervoor wordt de duty-ratio van het PWM-signaal gevarieerd. De spanning $V_{\rm an}$ na de versterker- en filterschakeling voldoet immers aan volgende uitdrukking:

$$V_{\rm an} = \delta \cdot A \cdot V_{\rm in} \tag{5.19}$$

waarbij $V_{\rm an}$ de versterkte en gefilterde spanning voorstelt, $V_{\rm in}$ de PWM-spanning afkomstig van de DSP is en δ de duty ratio van het PWM-signaal is. Achtereenvolgens worden volgende berekeningen uitgevoerd:

- De assnelheid $\omega_{\rm m}$ wordt uit de buffervariabele (zie interrupt 2) gehaald en opgeslagen.
- Uit de assnelheid $\omega_{\rm m}$ wordt de asversnelling $a_{\rm m}$ bepaald die nodig is om het inertiecompensatiekoppel te bepalen.
- De hoek $\theta_{\rm m}$ wordt bepaald door integratie van de assnelheid. Deze dient gekend te zijn om de effecten van torenschaduw en windschering te implementeren.
- De windsnelheid v wordt gemoduleerd met het effect van torenschaduw en windschering.

- De assnelheid vormt samen met de windsnelheid de basis voor de berekening van het turbinekoppel $T_{\rm t}$.
- Daarnaast wordt ook het tandwielkast
compensatiekoppel $T_{\rm tand}$ berekend dat compenseert voor de verliezen in de tandwielkast.
- Aan de hand van de asversnelling wordt het compensatiekoppel T_{in} berekend om de inertie correct te emuleren.
- Uit de som van de verschillende koppels (zie vgl. 5.18) wordt de duty ratio van het PWMuitgangssignaal berekend.
- De bekomen duty ratio wordt omgezet in de juiste instelling van de PWM-module die het uitgangssignaal genereert.

Aangezien deze interrupt om de 3,4 ms wordt uitgevoerd, wordt de wenswaarde voor het koppel dus om de 3,4 ms aangepast. Tussendoor blijft de koppelwenswaarde constant.

Interrupt 2: Encodercommunicatie

Deze interrupt wordt om de $10 \,\mu$ s uitgevoerd en wordt getriggerd door het kloksignaal dat naar de encoder wordt gestuurd. De communicatie tussen DSP en encoder wordt volledig door deze interrupt verzorgd. Volgende acties vinden plaats:

- Er worden 17 bits data ingelezen.
- De ingelezen Gray-code wordt omgezet in een binaire code en vervolgens in een hoekwaarde tussen 0 rad en 2π rad.
- Aan de hand van de huidige positie en de vorige positie wordt de huidige assnelheid bepaald. Om de ruis te beperken bij het afleiden van de snelheid uit de positie, wordt een lopend gemiddelde genomen van zeven snelheidsmetingen. Dit vormt een goede trade-off tussen de eliminatie van de meetruis en het behoud van de snelheid en nauwkeurigheid van de snelheidsbepaling.
- De assnelheid wordt opgeslagen in een buffervariabele en doorgegeven aan interrupt 1. Het gebruik van een buffervariabele is nodig daar de assnelheid door beide interrupts gebruikt wordt. Werken zonder buffervariabele leidt tot een foutieve werking van het systeem.

Meer informatie over de details van de encodercommunicatie is te vinden in Bijlage C.

5.3.2 Opstart

Vooraleer de opstelling gebruikt kan worden, moeten volgende stappen ondernomen worden.

- De omvormer dient driefasig gevoed te worden met 380 V. Deze moet bovendien ingesteld worden op koppelregeling in open lus. Daarbij moeten de referentiewaarden voor het koppel en de bijhorende spanningen ingesteld worden zoals vermeld. De motor wordt op snelheid gebracht door in de modus *Hand On* een startkoppel te genereren. Om toe te laten dat de regeling verder gebeurt op basis van het spanningssignaal afkomstig van de DSP dient de omvormer in de modus *Auto On* gebracht te worden.
- De versterkerschakeling, tranceiver en encoder moeten gevoed worden met de juiste spanningen.

- Om de windsnelheid realtime te kunnen wijzigen en de assnelheid te kunnen aflezen, moet er gebruik gemaakt worden van de realtime-mode waarbij de DSP met de computer communiceert.
- De programmeerbare last dient ingeschakeld te worden en juist geconfigureerd te worden zodat een stabiel werkingspunt mogelijk is. De simulatieresultaten laten toe om een geschikte grootte van de driefasige weerstand te maken.
- Metingen van spanning en stroom gebeuren aan de hand van een volt- en ampèremeter. Samen met de meting van de assnelheid levert dit informatie over het geleverde koppel. De interface van de variabele lastweerstand beschikt bovendien over een meting van het actief vermogen en de $\cos(\varphi)$.
- Om dynamische verschijnselen in beeld te brengen kan de assnelheid (of eender welke variabele) weggeschreven worden naar een databestand.

5.4 Verificatie

Nu de emulatoropstelling gebouwd is, is het nodig om de correctheid ervan na te gaan. Hiertoe worden de meetresultaten vergeleken met de resultaten van de simulaties. Een goede overeenkomst tussen beide resultaten bevestigt de correcte werking van de emulator. Aangezien er reeds aangetoond werd dat het simulatiemodel voldoet, kan er besloten worden dat de emulator correct een kleine windturbine nabootst.

Het is echter onmiddellijk duidelijk dat het turbinemodel en generatormodel afwijkingen tussen het simulatiemodel en de emulator introduceren. Het turbinemodel kan exact in het simulatieprogramma geïmplementeerd worden, maar in de emulatoropstelling zal de nauwkeurigheid van de tandwielkastcompensatie de resultaten beïnvloeden. Het generatormodel kan afwijken van de realiteit door imperfecties en lichtjes variërende parameters zoals bv. $R_{\rm s}$, $L_{\rm d}$ en $L_{\rm q}$. Men kan dus kleine afwijkingen tussen de experimentele resultaten en de simulaties verwachten.

5.4.1 Instelling van het werkingspunt: statisch gedrag

Een eerste belangrijke indicatie van de goede werking is de controle van het ingestelde werkingspunt. Bij dit experiment wordt een constante windsnelheid aangelegd. De invloed van torenschaduw en windschering wordt niet in rekening gebracht, vandaar dat er gekozen wordt voor het turbinemodel Turbine Eenvoud. Nadat alle overgangsverschijnselen zijn uitgestorven (en de emulator dus een constante assnelheid bereikt) wordt de assnelheid $\omega_{\rm m}$ en het elektrisch vermogen P_e gemeten. De metingen worden uitgevoerd bij drie verschillende belastingen door de lastweerstand R te variëren. Ondertussen wordt de windsnelheid v gevarieerd om verschillende werkingspunten te bekomen. Aangezien de overgangsverschijnselen niet worden bekeken in deze test, wordt het statisch gedrag van de emulator bestudeerd. De verschillende situaties worden ook gesimuleerd en vergeleken met de meetdata. In Figuur 5.11 is het elektrisch vermogen $P_{\rm e}$ geplot in functie van de windsnelheid v. De resultaten zijn bevredigend, want de verschillen tussen de simulaties en de metingen zijn zeer klein. Naast het elektrisch vermogen $P_{\rm e}$ is ook de assnelheid $\omega_{\rm m}$ een belangrijke aanwijzing dat de emulator correct functioneert. De assnelheid wordt weergegeven in functie van de windsnelheid voor de verschillende belastingen in Figuur 5.12. Opnieuw is de overeenkomst tussen de simulaties en de experimentele metingen op de emulator overduidelijk. Wanneer de weerstand verlaagd wordt, is de belasting zoals verwacht hoger. Dit is zichtbaar in Figuur 5.11. Bij een windsnelheid van $6.5 \,\mathrm{m/s}$ is het elektrisch vermogen $P_{\rm e}$ respectievelijk 270 W, 380 W en 400 W. Terzelfdertijd zal de assnelheid $\omega_{\rm m}$ dalen



Figuur 5.11: Elektrisch vermogen $P_{\rm e}$ bij verschillende belastingen. X = experimenteel, O = simulatie.



Figuur 5.12: Assnelheid ω_m bij verschillende belastingen. X = experimenteel, O = simulatie.

bij een stijgende belasting. Bij de hoogste belasting wordt de minimaal vereiste windsnelheid om een stabiel werkingspunt te verkrijgen hoger, zijnde 6 m/s in plaats van 4 m/s. Dit is het gevolg van het lage turbinekoppel $T_{\rm t}$ bij lage windsnelheden. Het turbinekoppel is niet hoog genoeg om in evenwicht te komen met het generatorkoppel en de windturbine zal bijgevolg niet roteren.

Afgaand op deze resultaten kan er besloten worden dat de emulator correct werkt, toch wat het statisch gedrag betreft. De overeenkomst tussen simulatieresultaten en metingen is echter nog niet perfect door afwijkingen in de emulator (tandwielkastcompensatie) en het simulatiemodel (generatormodel). In Hoofdstuk 6 wordt onderzocht door welke wijzigingen een nog betere overeenkomst tussen de simulaties en de experimenten verkregen kan worden.

5.4.2 Instelling van het werkingspunt: dynamisch gedrag

In de vorige paragraaf werd aangetoond dat het werkingspunt correct wordt ingesteld door de emulator, op enkele kleine verschillen tussen simulatie en emulatie na. Dit komt overeen met het correct berekenen van turbinekoppel $T_{\rm t}$ en het tandwielkastcompensatiekoppel $T_{\rm tand}$. Het is echter nog niet duidelijk of het inertiecompensatiekoppel $T_{\rm in}$ juist berekend wordt. Bij het statisch gedrag werden de metingen uitgevoerd bij een constante assnelheid, wat onmiddellijk impliceert dat de asversnelling en het inertiecompensatiekoppel nul zijn. Om na te gaan of de inertie correct geëmuleerd wordt, wordt een stap in de windsnelheid v of de weerstandslast R aangelegd. Het stapantwoord van de assnelheid wordt uitgezet en vergeleken met de simulatieresultaten. Voor zowel de simulatie als de emulatie wordt er geen rekening gehouden met torenschaduw en windschering, dus het turbinetype *Turbine Eenvoud* wordt aangewend. De resultaten worden hieronder besproken. Eerst wordt een constante weerstandslast verondersteld, waarbij er een sprong optreedt in de windsnelheid. Vervolgens wordt een constante windsnelheid aangelegd met een sprong in de belasting.

Sprong in de windsnelheid bij een constante belasting

In de Figuren 5.14, 5.15 en 5.16 staat bovenaan het verloop van de windsnelheid v in functie van de tijd gegeven. Na 10s treedt er steeds een sprong op in de windsnelheid. Zoals reeds vermeld is de minimale windsnelheid waarbij er nog een stabiel werkingspunt bestaat afhankelijk van de belasting. Deze windsnelheid wordt naar boven afgerond en als startsnelheid gekozen. De maximale windsnelheid wordt beperkt door de variabele weerstandslast. Bij te hoge spanning treedt een beveiliging op waardoor de weerstand niet meer juist geregeld wordt. De klemspanning is afhankelijk van de assnelheid. Aangezien de assnelheid bij een lagere belasting hoger is voor dezelfde windsnelheid, zal de maximale windsnelheid dus hoger zijn voor hogere belastingen. Deze maximale windsnelheid wordt naar beneden afgerond en als eindsnelheid gebruikt.

Onderaan de figuren staat de variatie in assnelheid doorheen de tijd gegeven voor de simulaties en de experimentele metingen. Het verloop van de assnelheid is het stapantwoord op een sprong in de windsnelheid. Indien er geen enkele inertie in het systeem aanwezig was, zou de de assnelheid bij een sprong in de windsnelheid ook een sprong vertonen. Als er geen inertiecompensatie toegevoegd wordt, bepalen de inertie van de motor, tandwielkast en generator het stapantwoord. Aangezien deze inerties heel wat kleiner zijn dan de turbine-inertie zal de assnelheid veel sneller naar de eindwaarde evolueren zoals te zien in Figuur 5.13. Voor deze meting wordt de inertiecompensatie van de emulator uitgeschakeld. Indien Figuur 5.13 vergeleken wordt met Figuur 5.14 valt het verschil duidelijk op. Zonder inertiecompensatie wordt reeds na drie à vier seconden een nieuwe regimesnelheid bereikt. Met inertiecompensatie duurt dit langer dan 10 seconden, wat aangeeft dat er inderdaad een inertie geëmuleerd wordt. Dat het dynamisch verloop correct is, wordt met de volgende metingen en simulaties aangetoond. De metingen



Figuur 5.13: Dynamisch gedrag bij een sprong in de windsnelheid v van 4 m/s naar 7 m/s bij een lastweerstand R van 1000 Ω en zonder inertiecompensatie (meting op de emulator).

worden uitgevoerd bij drie verschillende belastingen: zwaar belast (300Ω) , matig belast (600Ω) en licht belast (1000Ω) . De overeenkomst tussen de metingen en de simulaties valt onmiddellijk op. De tijd die nodig is om opnieuw een constante assnelheid te bereiken, is gelijkaardig in de simulaties en de emulator, zeker bij de lichte en de zware belasting. Bij de matige belasting is de overeenkomst duidelijk minder goed. Dit is het gevolg van de sterker afwijkende assnelheden voor en na de sprong. Zoals reeds vermeld, wordt in Hoofdstuk 6 naar een oplossing gezocht om de simulatie en emulatie beter te laten aansluiten. Zoals verwacht geeft een toename van de windsnelheid een toename in de assnelheid, zijnde met enige tijdsvertraging ten gevolge van de inertie. De belangrijkste conclusie van deze paragraaf is dat de metingen aangeven dat de inertiecompensatie correct funtioneert, al is er toch heel wat ruimte voor verbeteringen.

Sprong in de belasting bij een constante windsnelheid

Vorige paragraaf toont aan dat de inertiecompensatie correct functioneert in het geval van een sprong in de windsnelheid. Hier wordt nagegaan of dit ook het geval is bij een sprong in de belasting. Er wordt een windsnelheid gekozen waarvoor er een stabiel werkingspunt bestaat bij de drie verschillende belastingen. De keuze valt op een windsnelheid v van 6 m/s. Vervolgens wordt een sprong aangelegd in de weerstand, zoals weergegeven wordt bovenaan de Figuren 5.17, 5.18 en 5.19. Onderaan wordt het stapantwoord van de assnelheid op deze belastingswijziging gegeven. De resultaten zijn gelijkaardig als bij een sprong in de snelheid. Het opgemeten dynamisch verloop komt redelijk goed overeen met de simulaties, al zijn er toch nog duidelijke afwijkingen tussen experiment en simulatie. Het verhogen van de belasting (van bv. 1000Ω naar 300Ω) heeft een lagere assnelheid tot gevolg, terwijl een belastingsverlaging (van 300Ω naar 1000Ω) het omgekeerde effect heeft. Ook de tijdsduur om een nieuwe regimesnelheid te bereiken komt goed overeen met de simulaties. De inertiecompensatie reageert dus ook correct in het geval van een belastingswijziging, maar verbeteringen zijn zeker aangewezen (zie Hoofdstuk 6).



Figuur 5.14: Dynamisch gedrag bij een sprong in de windsnelheid v van 4 m/s naar 7 m/s bij een lastweerstand R van 1000 Ω . --= experimenteel, —= simulatie.



Figuur 5.15: Dynamisch gedrag bij een sprong in de windsnelheid v van 4 m/s naar 8 m/s bij een lastweerstand R van 600Ω . --= experimenteel, --= simulatie.



Figuur 5.16: Dynamisch gedrag bij een sprong in de windsnelheid v van 6 m/s naar 9,5 m/s bij een lastweerstand R van 300Ω . --= experimenteel, --= simulatie.



Figuur 5.17: Dynamisch gedrag bij een sprong in de weerstand R van 1000Ω naar 600Ω bij een windsnelheid v van 6 m/s. --= experimenteel, -= simulatie.



Figuur 5.18: Dynamisch gedrag bij een sprong in de weerstand R van 1000Ω naar 300Ω bij een windsnelheid v van 6 m/s. --= experimenteel, -= simulatie.



Figuur 5.19: Dynamisch gedrag bij een sprong in de weerstand R van 300Ω naar 1000Ω bij een windsnelheid v van 6 m/s. --= experimenteel, -= simulatie.

5.4.3 Verificatie van torenschaduw en windschering

Ook de invloed van torenschaduw en windschering wordt geïmplementeerd op de emulatoropstelling. Aangezien de formules (4.29), (4.30), (4.31) en (4.32) behoorlijk ingewikkeld zijn, wordt er een eenvoudiger model gebruikt in de opstelling. Vooraleer het mogelijk is om rekening te houden met de invloed van torenschaduw en windschering, moet de hoek θ_m gekend zijn. Door de aanwezigheid van de tandwielkast is er geen eenduidig verband tussen de positie van de inductiemotor en deze van de generator. De hoek θ_m wordt dus berekend door de assnelheid ω_m te integreren. De discrete integratie in de DSP luidt:

$$\theta_{\rm m}(n) = \theta_{\rm m}(n-1) + \omega_{\rm m}(n) \cdot 0,0034 \tag{5.20}$$

waarbij $\theta_{\rm m}(n)$ de nieuwe hoek op tijdstip n is, $\theta_{\rm m}(n-1)$ de oude hoek op tijdstip n-1 is en $\omega_{\rm m}(n)$ de huidige assnelheid is. Een meting van de mechanische hoek $\theta_{\rm m}$ bij een assnelheid van ongeveer 20,8 rad/s staat weergegeven in Figuur 5.20. Uit simulaties blijkt dat onderstaande formule een



Figuur 5.20: Meting van de mechanische hoek $\theta_{\rm m}$ bij een assnelheid van 20,8 rad/s.

behoorlijke benadering levert voor de modulatie van de windsnelheid door de torenschaduw en de windschering. De windsnelheid v afkomstig van het windmodel wordt omgezet in de gemoduleerde windsnelheid v_1 die gebruikt wordt om het turbinekoppel T_t te berekenen.

$$v_1 = v \cdot \left(\frac{96 + 4\sin^2\left(\frac{\theta_{\text{blad}}}{2}\right)}{100}\right) \tag{5.21}$$

waarbij de bladhoek θ_{blad} gegeven wordt door $\theta_{\text{blad}} = 3\theta_{\text{m}}$. Aangezien de turbine drie bladen telt, treedt het effect van torenschaduw en windschering drie keer per omwenteling op. In Figuur 5.21 staat de gemoduleerde windsnelheid v_1 gegeven voor een windsnelheid v van 7 m/s en een assnelheid van ongeveer 21,33 rad/s. De dip in de windsnelheid ten gevolge van de aanwezigheid van de toren is duidelijk zichtbaar. Met deze wijzigingen in de emulatoropstelling kan het effect van torenschaduw en windschering onderzocht worden. Voor de simulaties wordt het turbinetype *Turbine Compleet* gebruikt. De instelling van het werkingspunt wordt onderzocht voor verschillende windsnelheden en belastingen en vergeleken met de simulatieresultaten. Bovendien wordt er een dynamische meting van de assnelheid uitgevoerd om na te gaan of de assnelheid periodiek fluctueert ten gevolge van torenschaduw en windschering.



Figuur 5.21: Meting van de gemoduleerde windsnelheid v_1 bij een assnelheid van 21,33 rad/s.

Statisch gedrag: instelling van het werkingspunt

In Figuur 5.22 worden de meetresultaten vergeleken met de simulaties. In het geval zonder torenschaduw en windschering is de overeenkomst behoorlijk. Het vereenvoudigd model blijkt dus te voldoen. Het is interessant om de metingen met en zonder de invloed van torenschaduw en windschering met elkaar te vergelijken. In Figuur 5.23 wordt de vergelijking gemaakt voor de verschillende werkingspunten.

Zoals verwacht zijn de assnelheid en het elektrisch vermogen altijd lager wanneer de invloed van torenschaduw en windschering in rekening wordt gebracht. Dit werd reeds eerder vastgesteld bij de verificatie van het simulatiemodel. De verstoring van de windsnelheid door de aanwezigheid van de toren zorgt voor een lager gemiddeld turbinekoppel en bijgevolg een lagere assnelheid en lager elektrisch vermogen. Het is wel opmerkelijk dat de verschillen zeer klein zijn. De invloed van torenschaduw en windschering op het geleverde elektrisch vermogen is dus eerder beperkt.

Dynamische assnelheidsmeting

Uit de simulaties blijkt er dat de assnelheid slechts heel weinig varieert ten gevolge van de dip in het turbinekoppel. Dit is het gevolg van de grote turbine-inertie die de turbinekoppelrimpel uitvlakt. Wanneer de assnelheid nu gemeten wordt op de emulatoropstelling, is de periodieke snelheidsvariatie niet waar te nemen. De variatie is zo klein dat ze volledig in de meetruis verdwijnt. Dit blijkt onmiddellijk uit Figuur 5.24. Bij een assnelheid van 34,6 rad/s valt een snelheidsvariatie met een periode van 0,06 s te verwachten. Dit is echter niet waar te nemen.

5.4.4 Besluit

De bovenstaande resultaten duiden op een correct werkende emulator. De juiste werkingspunten worden ingesteld en ook de dynamische respons voldoet aan de verwachtingen. Het vereenvoudigde model voor torenschaduw en windschering levert bevredigende resultaten op. Natuurlijk zijn er nog enkele verschillen tussen de simulatie en emulatie door afwijkingen in het simulatiemodel en de aansturing van de emulator. Deze zullen in het volgende hoofdstuk behandeld worden.



Figuur 5.22: Assnelheid ω_m en elektrisch vermogen P_e bij verschillende belastingen. X = experimenteel, O = simulatie.



Figuur 5.23: Assnelheid ω_m en elektrisch vermogen P_e bij verschillende belastingen. X = met torenschaduw en windschering, O = zonder torenschaduw en windschering.



Figuur 5.24: Meting van de assnelheid $\omega_{\rm m}$ bij een windnelheid van 7 m/s en een lastweerstand van 300 $\Omega.$

Hoofdstuk 6

Simulatie- en experimentele resultaten

6.1 Aanpassingen in het simulatiemodel

In het simulatiemodel is het generatormodel het gevoeligst voor afwijkingen tussen simulatieen experimentele resultaten. Het windmodel wordt zowel in de simulatiesoftware als op de emulatoropstelling op exact dezelfde wijze geïmplementeerd. De programmeerbare last zorgt ervoor dat de ingestelde weerstand ten alle tijde verwezenlijkt wordt zodat dit overeenkomt met het lastmodel in Simulink. De formules die het turbinemodel beschrijven zijn dezelfde voor het simulatiemodel en de emulator, al moeten er wel correcties uitgevoerd worden voor de inertie en de tandwielkast. De afwijkingen die hierdoor ontstaan tussen de simulaties en de metingen kunnen echter compleet aan de emulator toegeschreven worden en worden later besproken.

Om een correct generatormodel op te stellen worden de verschillende parameters experimenteel bepaald. De metingen van weerstand en inductantie werden uitgevoerd bij een vaste frequentie van 50 Hz. Aangezien de windturbine een variabele assnelheid heeft, varieert ook de frequentie in het elektrisch circuit van de generator. Ten gevolge van stroomverdringing zullen de weerstand en inductantie dus niet constant zijn, maar variëren met de frequentie (en dus met de assnelheid) [35]. Stroomverdringing treedt op in de geleiders van elektrische machines wanneer deze door wisselstromen doorlopen worden. De stroom zal zich niet meer uniform over de doorsnede verdelen zoals bij gelijkstroom het geval is, maar eerder naar de omtrek verdrongen worden (*skin effect*). Naburige geleiders kunnen ook een aandeel hebben in het verdringen van de stroom (*proximity effect*). Beide effecten zorgen ervoor dat de weerstand van de geleiders met toenemende frequentie zal verhogen. Ook de inductantie wordt beïnvloed door de stroomverdringing.

6.1.1 Frequentieafhankelijkheid van de flux van de permanente magneten

Om de flux van de permanente magneten te bepalen, wordt de openklemspanning gemeten bij verschillende assnelheden. In Hoofdstuk 4 wordt beschreven hoe hieruit de flux berekend wordt. Daar werd de flux voor elke assnelheid afzonderlijk berekend en vervolgens werd het gemiddelde van deze waarden als permanente magneetflux aangenomen. In Figuur 6.1 staat de flux uitgezet in functie van de assnelheid. Het is onmiddellijk duidelijk dat de veronderstelling van een constante flux van de permanente magneten gerechtvaardigd is. Enkel bij heel lage snelheden wijkt de flux licht af, wat waarschijnlijk het gevolg is van een onnauwkeurige meting van de openklemspanning. Bij de lage snelheden fluctueert de spanning namelijk sterk, wat een juiste meting bemoeilijkt. Indien de flux bij deze lage snelheden toch iets lager zou zijn,



Figuur 6.1: De flux van de permanente magneten $\Psi_{\rm PM}$ in functie van de assnelheid $\omega_{\rm m}$.

vormt dit geen probleem daar deze lage snelheden nooit bereikt worden. Bij snelheden lager dan 10 rad/s is het turbinekoppel immers zo laag dat er geen stabiel werkingspunt mogelijk is. De flux $\Psi_{\rm PM}$ varieert dus niet met de assnelheid. Een constante waarde van 1,188 Wb wordt ook in het gewijzigde simulatiemodel behouden.

6.1.2 Frequentieafhankelijkheid van de statorweerstand en inductantie

De meting van de statorweerstand $R_{\rm s}$ en de inductanties $L_{\rm d}$ en $L_{\rm q}$ gebeurde in Hoofdstuk 4 bij een frequentie van 50 Hz. Bovendien werd het inductantieverloop doorheen verschillende rotorposities opgemeten waaruit het sinusverloop duidelijk werd. Om de invloed van stroomverdringing na te gaan, worden deze metingen herhaald bij verschillende frequenties tussen 25 Hz en 75 Hz. Om $L_{\rm d}$ en $L_{\rm q}$ te berekenen, volstaat het om enkel de maximale en minimale inductantie op te meten. In Figuur 6.2 staat het weerstandsverloop in functie van de frequentie, in Figuur 6.3 is het inductantieverloop gegeven. Zoals verwacht blijken de inductanties $L_{\rm d}$ en $L_{\rm q}$



Figuur 6.2: De statorweerstand R_s in functie van de frequentie f.



Figuur 6.3: De inductanties L_d (O) en L_q (X) in functie van de frequentie f.

behoorlijk ongevoelig voor een veranderende frequentie (in het vooropgestelde frequentiebereik). $L_{\rm q}$ blijft quasi constant, $L_{\rm d}$ neemt lichtjes toe met toenemende frequentie. De statorweerstand $R_{\rm s}$ daarentegen is wel zeer sterk afhankelijk van de frequentie. Bij de hogere frequenties is er een zeer sterke toename van de weerstand ten gevolge van stroomverdringing in de geleiders. Het is dus niet a priori duidelijk of de invloed van wijzigende parameters een significante invloed op de simulatieresultaten zal hebben. Enkele simulaties met aangepaste parameters zijn zeker aangewezen.

6.1.3 Simulaties met gewijzigde parameters

Uit eerdere simulaties zijn de werkingspunten (in het bijzonder de assnelheid) reeds gekend. Daar de wijziging van de parameters bij een veranderende frequentie niet al te groot is, is het aannemelijk om te veronderstellen dat de werkingspunten in de buurt zullen liggen van deze bekomen bij de simulaties met ongewijzigde parameters. De simulaties zullen opnieuw uitgevoerd worden met vaste parameters, alleen worden ze aangepast zodat ze overeenkomen met de waarde die overeenkomt met de waarde van de parameter bij de verwachte assnelheid. Een assnelheid van $39,27 \,\mathrm{rad/s}$ komt overeen met een elektrische frequentie f van $50 \,\mathrm{Hz}$. De bijhorende parameters zijn: $R_{\rm s} = 13,472\,\Omega, L_{\rm d} = 257.34\,\mathrm{mH}$ en $L_{\rm q} = 102,87\,\mathrm{mH}$. Indien een assnelheid van 39 rad/s verwacht wordt, is het dus aangewezen om bovenstaande parameters te gebruiken. Is op basis van de eerdere simulatieresultaten een andere assnelheid te verwachten. dan worden de parameters zo goed mogelijk voor deze assnelheid aangepast. De bovenstaande methode zorgt er natuurlijk niet voor dat de parameters exact overeenkomen met de werkelijke parameters, aangezien het werkingspunt door de gewijzigde parameters zal veranderen. De parameters zullen echter dichter aansluiten bij de werkelijke parameters dan het geval was bij de eerdere simulaties. De gebruikte parameters $R_{\rm s}$, $L_{\rm d}$ en $L_{\rm q}$ voor de verschillende simulaties zijn terug te vinden in Bijlage E. De simulatieresultaten staan samengevat in Figuren 6.4 en 6.5. Als turbinetype werd voor deze simulaties *Turbine Eenvoud* gekozen, zowel voor de simulaties zonder gewijzigde parameters als voor die met gewijzigde parameters. Hieruit blijkt dat de werkingspunten nauwelijks verschillen indien de gewijzigde parameters gebruikt worden.



Figuur 6.4: Assnelheid ω_m bij verschillende belastingen. X = met gewijzigde parameters, O = zonder gewijzigde parameters.



Figuur 6.5: Generatorkoppel T_g bij verschillende belastingen. X = met gewijzigde parameters, O = zonder gewijzigde parameters.

6.1.4 Besluit

In deze paragraaf werd de invloed van variërende generatorparameters onderzocht. De flux van de permanente magneten blijkt onafhankelijk van de frequentie. De statorweerstand $R_{\rm s}$ en inductanties $L_{\rm d}$ en $L_{\rm q}$ vertonen echter een beperkte verandering in het beschouwde frequentiebereik. De simulaties met deze gewijzigde parameters tonen echter aan dat er nauwelijks een invloed is op het ingestelde werkingspunt. Het eenvoudig model met constante generatorparameters dat beschreven wordt in Hoofdstuk 4 voldoet dus. De afwijking tussen simulatieresultaten en experimentele metingen kan niet opgelost worden door wijzingen aan te brengen in het simulatiemodel.

6.2 Aanpassingen in de emulatoropstelling

De mogelijkheid om wijzigingen aan te brengen in het simulatiemodel werd reeds behandeld. Het is echter ook mogelijk om de aansturing van de emulator aan te passen om een betere overeenkomst te bekomen tussen simulatie- en emulatieresultaten. Windmodel en lastmodel komen reeds goed overeen met de situatie op de emulator. In de vorige paragraaf werd aangetoond dat ook het generatormodel een goede beschrijving vormt voor de generator in de testopstelling. De implementatie van het turbinemodel op de emulator vormt de belangrijkste bron van afwijkingen. Het tandwielkastcompensatiekoppel T_{tand} en het inertiecompensatiekoppel T_{in} hebben een zeer grote invloed op het correct functioneren van de emulator. Afwijkingen in deze modellen leiden dus zeker tot verschillen tussen de simulaties en experimentele resultaten. Er wordt dan ook iets dieper ingegaan op beide modellen en de mogelijke aanpassingen.

6.2.1 Het aangepast tandwielkastcompensatiekoppel

In Hoofdstuk 5 werd het belang van een correct tandwielkastmodel reeds toegelicht. De metingen om dit model op te stellen, gebeurden bij een onbelaste generator. Het is echter goed mogelijk dat de tandwielkast zich onder belasting lichtjes anders gedraagt. Tijdens de metingen op de emulatoropstelling worden in het bijzonder twee afwijkingen ten opzichte van het opgestelde model vastgesteld:

- Het tandwielkastcompensatiekoppel wordt gemodelleerd als een koppel dat rechtevenredig is met de assnelheid: $T_{\text{tand}} = 0,02843 \cdot \omega_{\text{m}}$. Bij een assnelheid gelijk aan nul is ook het compensatiekoppel gelijk aan nul. Bij zeer lage snelheden blijkt dit echter niet meer te kloppen. De inductiemotor moet aangestuurd worden met een koppel van minstens 0,25 Nm om schokkend roteren te voorkomen. De bijhorende assnelheid bedraagt ongeveer 5 tpm. Het lijkt dus aangewezen om het tandwielkastcompensatiekoppel een zeker constant koppel mee te geven bovenop het lineair toenemend koppel in functie van de snelheid.
- In de simulatieresultaten uit Hoofdstuk 5 is een duidelijk patroon in de afwijkingen tussen de simulatieresultaten en de experimentele gegevens te zien. Bij assnelheden lager dan 40 rad/s liggen het experimenteel bepaalde elektrisch vermogen en de experimenteel bepaalde assnelheid lager dan de waarden volgend uit de simulaties. Bij assnelheden hoger dan 40 rad/s liggen de experimentele resultaten hoger dan de waarden volgend uit de simulaties. Bovendien worden de verschillen groter naarmate de assnelheid verder van 40 rad/s verwijderd ligt. Het lijkt dus alsof het compensatiekoppel voor assnelheden lager dan 40 rad/s te klein is en voor hogere assnelheden te groot is. Een aanpassing van de helling van het lineair toenemend koppel is dus aangewezen.
Rekening houdend met bovenstaande vaststellingen is het mogelijk om via (gerichte) trial and error een nieuwe uitdrukking voor de tandwielkast op te stellen. Er wordt een constant koppel opgeteld bij het lineair toenemend koppel en de helling hiervan wordt een beetje verkleind. Op deze manier verkrijgt men volgende uitdrukking voor het tandwielkastcompensatiekoppel T_{tand} :

$$T_{\text{tand}} = 0,265 + 0,0221 \cdot \omega_{\text{m}} \tag{6.1}$$

$$= T_{\rm const} + D_{\rm tand,2} \cdot \omega_{\rm m} \tag{6.2}$$

Deze uitdrukking wordt nu op de emulatoropstelling geïmplementeerd en er worden opnieuw enkele metingen gedaan van de ingestelde werkingspunten. Ook het dynamisch gedrag wordt opnieuw bekeken.

Statisch gedrag

De assnelheid $\omega_{\rm m}$ en het elektrisch vermogen $P_{\rm e}$ worden opnieuw gemeten bij verschillende belastingen. De resultaten worden vergeleken met de simulaties en staan weergegeven in Figuur 6.6. Als turbinetype voor de simulaties en de emulator werd het type *Turbine Eenvoud* gekozen. De overeenkomst tussen experimentele resultaten en simulaties is al heel wat beter dan bij de eerdere metingen zonder aangepast tandwielkastmodel. Er zijn wel nog enkele kleine verschillen te bemerken. Het is echter zeer waarschijnlijk dat deze kunnen weggewerkt worden door de waarden van het constante koppel $T_{\rm const}$ en de helling van het snelheidsafhankelijke koppel $D_{\rm tand,2}$ in het tandwielkastcompensatiekoppel verder te verfijnen. Hiervoor moeten deze parameters via *trial and error* bijgesteld worden. Dit is een tijdrovend proces, aangezien de verschillende metingen telkens opnieuw moeten worden uitgevoerd en vergeleken met de simulatieresultaten tot een optimum bereikt wordt. De overeenkomst tussen simulatie- en experimentele resultaten is echter al meer dan behoorlijk, zodat deze zoektocht in dit eindwerk niet meer uitgevoerd wordt.

Dynamisch gedrag

Naast de metingen die de correcte instelling van het werkingspunt bevestigen, worden ook enkele dynamische metingen opnieuw uitgevoerd. De verbeterde overeenkomst tussen simulatie- en experimentele resultaten wanneer het aangepaste tandwielkastmodel gebruikt wordt, laat vermoeden dat ook het dynamisch gedrag minder afwijkingen zal vertonen. In Figuren 6.7 en 6.8 is het resultaat van twee dynamische metingen te zien. In vergelijking met de eerdere resultaten is de overeenkomst met het aangepaste tandwielkastmodel veel beter. Er blijft een kleine afwijking zichtbaar tussen de simulatie- en experimentele resultaten, maar deze is heel wat beperkter dan bij het eerste tandwielkastmodel. Een extra mogelijkheid tot verbetering wordt besproken in de volgende paragraaf.

6.2.2 Het aangepast inertiecompensatiekoppel

Bij het berekenen van het inertiecompensatiekoppel wordt er rekening gehouden met de reeds aanwezige motorinertie (zie Hoofdstuk 5). De inertie van de motor en de bijhorende tandwielkast is echter niet exact gekend (in de datasheet wordt enkel de motorinertie vermeld). Een afwijkende inertiewaarde leidt tot een foutief inertiecompensatiekoppel en bijgevolg een fout dynamisch gedrag. Op de metingen met het aangepaste tandwielkastmodel in de vorige paragraaf is een kleine afwijking te zien tussen de experimentele resultaten en de simulaties. De instelling van het nieuwe werkingspunt verloopt iets trager op de emulatoropstelling dan het geval is in de simulaties. Dit is waarschijnlijk het gevolg van een onderschatting van de motor- en



Figuur 6.6: Assnelheid $\omega_{\rm m}$ en elektrisch vermogen $P_{\rm e}$ bij verschillende belastingen. X = experimenteel met aangepast tandwielkastmodel, O = simulatie.



Figuur 6.7: Dynamisch gedrag bij een sprong in de weerstand R van 1000Ω naar 300Ω bij een windsnelheid v van 6 m/s. --= experimenteel met aangepast tandwielkastmodel, -= simulatie.



Figuur 6.8: Dynamisch gedrag bij een sprong in de weerstand R van 300Ω naar 1000Ω bij een windsnelheid v van 6 m/s. --= experimenteel met aangepast tandwielkastmodel, -= simulatie.

tandwielkastinertie. De verklaring voor de tragere instelling van het werkingspunt volgt uit de uitdrukking voor het inertiecompensatiekoppel:

$$T_{\rm in} = (J_{\rm v} - J_{\rm t}) \frac{\mathrm{d}\omega_{\rm m}}{\mathrm{d}t}$$
(6.3)

$$J_{\rm v} = n^2 J_{\rm m} \tag{6.4}$$

waarbij $J_{\rm m}$ de motorinertie is, $J_{\rm t}$ de turbine-inertie is en n de overbrengingsverhouding van de tandwielkast is. Een onderschatting van de inertie $J_{\rm m}$ zorgt voor een grotere absolute waarde van het inertiecompensatiekoppel $T_{\rm in}$. Er wordt dus meer inertie geëmuleerd dan er eigenlijk nodig is om het gewenste gedrag te bekomen. Bijgevolg duurt het overgangsverschijnsel iets langer dan in de simulaties. Om een exacte overeenkomst te verkrijgen, is een betere schatting van de inertie $J_{\rm m}$ gewenst die wel rekening houdt met de aanwezigheid van de tandwielkast. Via *trial and error* kan dan een quasi perfecte overeenkomst verkregen worden. Dit is opnieuw een tijdrovend proces aangezien de dynamische metingen eerst verwerkt moeten worden om ze vervolgens samen met de simulatieresultaten te plotten. Na voldoende metingen kan dan de best passende waarde voor de inertie geselecteerd worden. De laatste metingen met het aangepaste tandwielkastmodel komen echter al behoorlijk goed overeen met de simulatieresultaten, dus deze inertie wordt in dit eindwerk niet meer verder verfijnd.

6.2.3 Besluit

In de vorige paragrafen werden de aanpassingen in de emulatoropstelling besproken. Een aangepast model voor de tandwielkast werd voorgesteld en op de emulator geïmplementeerd. De meetresultaten tonen duidelijk de betere overeenkomst tussen experimenten en simulaties, al zijn er nog heel kleine afwijkingen op te merken. Een doorgedreven optimalisatie van de verschillende parameters kan deze nog verder minimaliseren. De belangrijkste conclusie is dat enkele gerichte aanpassingen in de aansturing van de emulator toelaten om een zeer goede overeenkomst te verkrijgen tussen de simulaties en de meetresultaten.

6.3 Flicker ten gevolge van torenschaduw en windschering

6.3.1 Algemeen

Het grillig karakter van de wind zorgt ervoor dat het elektrisch vermogen dat door een windturbine geleverd wordt, fluctueert. Bovendien zorgt de aanwezigheid van effecten zoals torenschaduw en windschering voor een periodieke dip in het turbinekoppel $T_{\rm t}$ en ook in het turbinevermogen $P_{\rm t}$. Het is interessant om te onderzoeken of deze dip zich ook manifesteert in het uitgaand elektrisch vermogen $P_{\rm e}$. Een periodisch fluctuerend elektrisch vermogen kan leiden tot snelle spanningsfluctuaties, ook wel gekend als *flicker* [36]. Ook in de literatuur is het probleem van *flicker* bij windturbines reeds goed gekend [37–40]. In deze paragraaf wordt aan de hand van enkele simulaties onderzocht of het ook een probleem vormt bij de kleine windturbine die in deze thesis gemodelleerd werd.

6.3.2 Vermogenfluctuaties bij een constante windsnelheid

Om de vermogenfluctuaties ten gevolge van een variabele windsnelheid te elimineren, wordt er gekozen voor een constante windsnelheid v van 7 m/s.



Figuur 6.9: Elektrisch vermogen $P_{\rm e}$ en turbinevermogen $P_{\rm t}$ in functie van de tijd, rekening houdend met torenschaduw en windschering.

Twee verschillende situaties worden met elkaar vergeleken:

- zonder torenschaduw en windschering: turbinetype Turbine Eenvoud
- met torenschaduw en windschering: turbinetype Turbine Complet

De lastweerstand wordt constant gehouden op $R = 300 \,\Omega$ en de assnelheid is constant gedurende de simulaties. Dit wordt bekomen door als startsnelheid van de simulaties de regimesnelheid te nemen zodat de windturbine zich van bij de start van de simulaties in het stabiele werkingspunt bevindt. Voor het geval met torenschaduw geldt er dat $\omega_{\rm m} = 35,139 \,\mathrm{rad/s}$, voor het geval zonder torenschaduw is de assnelheid iets hoger: $\omega_{\rm m} = 35,652 \,\mathrm{rad/s}$.

In Figuur 6.9 staan het elektrisch vermogen $P_{\rm e}$ en het turbinevermogen $P_{\rm t}$ uitgezet in functie van de tijd voor de simulatie met het turbinetype *Turbine Compleet*. Bij het turbinevermogen is de dip ten gevolge van torenschaduw en windschering duidelijk zichtbaar. Het elektrisch vermogen vertoont een periodieke dip ten gevolge van het reluctantie-effect, maar op het eerste zicht lijkt er geen extra dip ten gevolge van torenschaduw aanwezig te zijn.

Om uitsluitsel te geven, wordt het spectrum bepaald van zowel de gemoduleerde windsnelheid v_1 als het elektrisch vermogen $P_{\rm e}$. In Figuur 6.10 is het spectrum van de gemoduleerde windsnelheid voor beide gevallen te zien. Wanneer torenschaduw en windschering buiten beschouwing worden gelaten, zijn er zoals verwacht geen uitgesproken pieken in het spectrum waar te nemen. Wordt er wel rekening gehouden met deze effecten, dan is duidelijk een piek zichtbaar bij een frequentie rond 17 Hz. Dit komt overeen met de frequentie van de periodieke dip in de windsnelheid ten gevolge van torenschaduw en windschering:

$$f_{\rm dip} = \frac{\omega_{\rm dip}}{2\pi} = \frac{3\omega_{\rm m}}{2\pi} = \frac{3 \cdot 35,139 \,\mathrm{rad/s}}{2\pi} = 16,78 \,\mathrm{Hz}$$

De volgende piekjes die zichtbaar zijn, zijn veelvouden van deze frequentie f_{dip} . Het is wel belangrijk om op te merken dat de amplitude van de dip in de windsnelheid behoorlijk klein is (ongeveer 5% van de maximale waarde van de windsnelheid).



(c) Detailweergave van het gebied van interesse. Links: met torenschaduw en windschering, rechts: zonder torenschaduw en windschering.

Figuur 6.10: Het spectrum van de gemoduleerde windsnelheid v_1 .



(b) Zonder torenschaduw en windschering.

Figuur 6.11: Het spectrum van het elektrisch vermogen $P_{\rm e}$.

Nu duidelijk is dat de invloed van torenschaduw en windschering kan afgeleid worden uit het spectrum van de gemoduleerde windsnelheid v_1 , wordt ook het spectrum van het elektrisch vermogen P_e bepaald. Dit spectrum staat weergegeven in Figuur 6.11. De resultaten bevestigen de eerdere conclusie: het effect van torenschaduw en windschering is niet waar te nemen in het elektrisch vermogen P_e . Indien er een duidelijk waarneembaar effect van torenschaduw en windschering in het elektrisch vermogen aanwezig zou zijn, valt er een piek te verwachten in het spectrum van P_e bij de dipfrequentie $f_{dip} = 16,78$ Hz. Dit is echter niet het geval. De grote piek die zichtbaar is in het spectrum van het vermogen is het gevolg van het reluctantie-effect. Deze piek treedt op bij onderstaande frequenties:

$$f_{\rm rel, eenvoud} = 181, 57 \, \text{Hz}$$

 $f_{\rm rel, complet} = 178, 96 \, \text{Hz}$

Het kleine verschil tussen beide frequenties is het gevolg van de lichtjes verschillende assnelheid $\omega_{\rm m}$.

6.3.3 Besluit

Het besluit van deze paragraaf is duidelijk. Voor de onderzochte kleine windturbine is de invloed van torenschaduw en windschering van geen belang. De grootste vermogenfluctuatie is het gevolg van het reluctantie-effect van de generator.

Hoofdstuk 7

Slotbeschouwingen en verder onderzoek

Dit hoofdstuk geeft een samenvatting van dit werk. De belangrijkste resultaten en conclusies worden vermeld. Tot slot worden ook nog enkele mogelijkheden voor verder onderzoek over dit onderwerp voorgesteld.

7.1 Besluiten

Hoofdstuk 1 besprak kort het belang van windturbines in de huidige en toekomstige elektriciteitsproductie. Om problemen te vermijden bij een toename van het aantal windturbines is het van zeer groot belang om de werking ervan te doorgronden. Een correct windturbinemodel (voor zowel grote als kleine windturbines) is hierbij essentieel. Dit model kan vervolgens op een windturbine-emulator geïmplementeerd worden, wat het onderzoek naar nieuwe convertoren en sturingen sterk vereenvoudigt. Dit eindwerk is specifiek gericht op het ontwikkelen van een model en emulator voor kleine windturbines.

In Hoofdstuk 2 werd de werking van driebladige horizontale windturbines toegelicht. De meest voorkomende types werden vermeld, samen met hun voor- en nadelen. Aangezien windturbines vaak in windmolenparken gebouwd worden, werd ook hier even aandacht aan besteed. Vaak beschikken deze parken over extra uitrustingen (bv. compensatie van reactief vermogen) om de performantie te verhogen.

Hoofdstuk 3 behandelde het modelleren van windturbines op basis van gegevens uit de literatuur. Het model werd opgesplitst in een aantal deelmodellen. Verschillende mogelijkheden voor het simuleren van een verloop van de windsnelheid werden voorgesteld in het windmodel. Eén van deze windmodellen werd gekozen om in dit eindwerk te gebruiken. Vervolgens werd het turbinemodel besproken. De belangrijkste parameter van dit model vormt de vermogenscoëfficiënt $C_{\rm p}(\lambda)$. Deze bepaalt welke fractie van het vermogen vervat in de wind omgezet wordt in vermogen beschikbaar op de generatoras. Om de turbine volledig te karakteriseren werd ook de inertie van de turbinerotor behandeld. De aanwezigheid van de toren en de rotatie van de turbinebladen doorheen luchtlagen met een lichtjes verschillende windsnelheid werden in een model voor torenschaduw en windschering beschreven. Tot slot werden ook de modellen voor de tandwielkast, de generator, de convertor en het net even kort aangehaald.

In Hoofdstuk 4 kwam de implementatie van het windturbinemodel in Matlab/Simulink aan bod. Het gekozen windmodel werd nader toegelicht. Het windmodel staat eerder los van de andere deelmodellen aangezien het niet *real-time* wordt uitgerekend tijdens de simulaties. Dit zou teveel rekenkracht vergen en de simulaties onnodig vertragen. Er werd geopteerd om het benodigde verloop van de windsnelheid eerst te simuleren en weg te schrijven naar een bestand. Dit bestand wordt vervolgens ingelezen in het windturbinemodel. Om de werking van het windmodel te illustreren werden enkele sterk verschillende windtypes voorgesteld. Vervolgens werd de opbouw van het turbinemodel nader toegelicht. De belangrijkste parameters van de turbinerotor (zoals rotordiameter, inertie en $C_{\rm p}(\lambda)$) werden gekozen om zo goed mogelijk een kleine windturbine na te bootsen. Bij dit turbinemodel werden enkele turbinetypes gedefinieerd (waarbij de invloeden van torenschaduw en windschering al dan niet aanwezig zijn) die verder in het eindwerk gebruikt werden. Daarna werd de opbouw van het generatormodel dat ter beschikking stond kort uitgelegd. Het grote belang van de generatorparameters zoals de flux $\Psi_{\rm PM}$, de weerstand $R_{\rm s}$ en de inductanties $L_{\rm d}$ en $L_{\rm q}$ werd hieruit onmiddellijk duidelijk. Om een goede overeenkomst tussen de simulaties en de experimentele resultaten op de emulator toe te laten, werden deze zo nauwkeurig mogelijk bepaald. Als laatste deelmodel werd het model van een variabele weerstandslast besproken. De verificatie van het simulatiemodel aan de hand van enkele simulaties en berekeningen vormt het sluitstuk van dit hoofdstuk.

De opbouw van de windturbine-emulator werd beschreven in Hoofdstuk 5. De turbinerotor wordt vervangen door een vermogenomvormer die een inductiemotor met tandwielkast aanstuurt. De omvormer stuurt het koppel van de motor en laat toe dat een windturbine nagebootst wordt. Vooraleer dit mogelijk was, moesten wel enkele problemen opgelost worden. Ten eerste is de inertie van het geheel motor + tandwielkast heel wat lager dan de inertie van een turbinerotor. Er werd een model opgesteld om te compenseren voor dit verschil. Dit resulteert in een inertiecompensatiekoppel $T_{\rm in}$ dat bovenop het turbinekoppel $T_{\rm t}$ als wenswaarde aan de vermogenomvormer aangeboden wordt. Ten tweede zorgt de aanwezigheid van de tandwielkast voor een koppelverlies ten gevolge van wrijving. Het modelleren van dit koppelverlies in functie van de assnelheid lijdt tot een tandwielkastcompensatiekoppel T_{tand} dat extra wordt meegestuurd met de koppelwenswaarde. Het doel van de verschillende compensatiekoppels is om het gewenste koppel op de generatoras te verkrijgen. Na bespreking van de verschillende onderdelen van de windturbine-emulator en de werking van het DSP-programma werd er overgegaan tot experimentele verificatie. Enkele gerichte simulaties werden vergeleken met meetresultaten op de emulator. De overeenkomsten bleken behoorlijk goed te zijn, al was er duidelijk nog ruimte voor verbetering. De inhoud van Hoofdstuk 4 werd omgezet in de publicatie [34].

In Hoofdstuk 6 werden enkele wijzigingen voorgesteld in het simulatiemodel en de emulatoropstelling om de resultaten van beide beter te laten overeenkomen. Eerst werden de mogelijke wijzigingen in het generatormodel besproken. Het generatormodel kwam naar voor als het model waar de grootste afwijkingen mogelijk waren ten gevolge van wijzigende parameters bij een variabele assnelheid. Het onderzoek wees echter uit dat de invloed te verwaarlozen is voor het werkingsgebied van de emulator. Daarna werd onderzocht welke aanpassingen in de sturing van de emulatoropstelling een verbeterd gedrag van de emulator tot gevolg hebben. Het bleek snel dat enkele kleine aanpassingen in het tandwielkastcompensatiekoppel de overeenkomst tussen simulatie- en experimentele resultaten sterk kunnen verbeteren. Mogelijkheden tot verdere verbeteringen werden voorgesteld, maar in het kader van dit eindwerk niet meer verder onderzocht. Tot slot werd de invloed van Flicker ten gevolge van torenschaduw en windschering, een vaak bestudeerd fenomeen bij grote windturbines, onderzocht aan de hand van het simulatiemodel.

In dit eindwerk werd geprobeerd om een kleine windturbine zo goed mogelijk te modelleren. De parameters van de turbinerotor werden dan ook zo nauwkeurig mogelijk afgesteld op beschikbare gegevens van fabrikanten van kleine windturbines. Een heikel punt bij het turbinemodel vormt echter de vermogenscoëfficiënt $C_{\rm p}(\lambda)$. In de literatuur zijn er slechts weinig curven terug te vinden, quasi uitsluitend voor grote windturbines. De vaak extreme vormen van de turbinebladen bij kleine windturbines doen vermoeden dat de vermogenscoëfficiënt van deze types wel eens sterk zou kunnen verschillen van deze die in dit werk gebruikt werd. Dit doet echter niets af aan het nut van de gebouwde windturbine-emulator en het simulatiemodel. De vermogenscoëfficiënt kan immers zeer eenvoudig aangepast worden in zowel het simulatiemodel als de emulatorsturing indien een betere curve door bijkomend onderzoek beschikbaar is. Ook de andere turbineparameters (rotordiameter, turbine-inertie, invloed van torenschaduw, ...) zijn makkelijk te wijzigen. Dit maakt de emulator tot een handig en flexibel werkinstrument bij het onderzoek naar kleine windturbines. De goede overeenkomst tussen simulatie- en experimentele resultaten geeft aan dat de doelstelling van dit eindwerk bereikt is, namelijk het bouwen van een emulator die correct een kleine windturbine emuleert.

7.2 Mogelijkheden voor verder onderzoek

7.2.1 Maximum power point tracking van kleine windturbines

In het huidige simulatiemodel en de emulatoropstelling is de generator aangesloten op een eenvoudige weerstandslast. In een echte windturbine wordt de generator echter via een vermogenomvormer met het net verbonden. Het simulatiemodel moet dus uitgebreid worden met een model van deze omvormer. Deze omvormer bestaat uit een gelijkrichter verbonden met een DC-bus. Een invertor verbindt de DC-bus met het net.

Zoals vermeld werd in dit eindwerk, heeft de windturbine een optimale assnelheid waarbij de energieopbrengst het hoogst is (cfr. het maximum in de $C_{\rm p}(\lambda)$ -curve). De gelijkrichter wordt aangestuurd door een Maximum Power Point Tracking-algoritme (MPPT) dat de turbine naar de optimale assnelheid stuurt om de opbrengst te maximaliseren. De MPPT zal het koppel van de generator regelen via de gelijkrichter. Zo wordt altijd het gewenste werkingspunt verkregen, ook voor wisselende windsnelheden.

Er zijn reeds verschillende MPPT-technieken gekend [3]:

- Meting van de windsnelheid v met een anemometer en een meting van de assnelheid $\omega_{\rm m}$ maakt het mogelijk om de snellopendheid λ te berekenen. De assnelheid wordt nu geregeld om een optimale snellopendheid te bekomen.
- *Hill Climbing Searching*: wanneer de assnelheid verhoogd wordt, verwacht men een stijging van het vermogen. Zolang het vermogen toeneemt, verhoogt men de assnelheid. Neemt het vermogen echter af, dan moet de assnelheid verlaagd worden. Door voortdurend de assnelheid in de juiste richting bij te stellen, bekomt men het maximaal uitgangsvermogen.
- Door gebruik te maken van een opzoektabel waarin de gegevens over assnelheid, windsnelheid en vermogen zijn opgeslagen, kiest de MPPT-controle het beste werkingspunt.
- enz., ...

Voor grote windturbines zijn deze algoritmes reeds goed uitgewerkt, maar voor kleine windturbines blijken deze vaak niet goed te functioneren. Er is dan ook nog heel wat verbetering mogelijk en bijkomend onderzoek is zeker gewenst.

7.2.2 Uitbreiding van het windturbinemodel en de emulator

De gebouwde emulator bootst reeds correct het statisch en dynamisch gedrag van een kleine windturbine na. Ook de effecten van torenschaduw en windschering werden opgenomen in de opstelling. Er zijn echter nog heel wat uitbreidingen mogelijk in het windturbinemodel en de emulator.

In dit eindwerk werd er geen rekening gehouden met de orïentatie van de turbine ten opzichte van de windrichting. Er werd verondersteld dat de wind altijd loodrecht op de turbinebladen stond. In een werkelijke windturbine is dit niet altijd het geval. Grote windturbines beschikken daarom meestal over actieve (gemotoriseerde) kruimechanismen die de turbine opnieuw in de juiste stand brengen. Kleine windturbines beschikken vaak enkel over een passief kruimechanisme in de vorm van een windvaan. Dit garandeert bovendien niet altijd de perfecte oriëntatie. Het opstellen van een model voor de verschillende kruimechanismen en de implementatie ervan op de emulator laat toe om het gedrag van de turbine tijdens het kruien te bestuderen.

De grote windturbines zijn bijna uitsluitend van het *upwind*-type. Dit heeft als voordeel dat de invloed van torenschaduw heel wat minder is. Bij de kleine windturbines zijn er echter bij verschillende fabrikanten turbines van het *downwind*-type terug te vinden. Aangezien bij kleine windturbines vaak geen actieve kruimechanismen aanwezig zijn, hebben deze het voordeel dat ze zich automatisch naar de wind richten. Het opstellen van een model voor deze *downwind*turbines laat een vergelijking toe tussen de verschillende turbinetypes.

In de huidige emulator werd er geen rekening gehouden met de stijfheid en de inertie van de aandrijflijn tussen de turbinerotor en de generator. Een correct model laat toe om ook deze invloeden mee te emuleren.

In Hoofdstuk 3 kwamen de verschillende pulsaties in het uitgaand vermogen van de turbine aan bod. In het huidige model werd enkel rekening gehouden met 3p-pulsaties ten gevolge van torenschaduw en windschering. Het is echter mogelijk om ook de pulsaties bij de resonatiefrequentie van de toren, 1p-pulsaties ten gevolge van een ongebalanceerde of asymmetrische rotor en np-pulsaties in het model op te nemen.

Bovenstaande aanvullingen in het windturbinemodel en de emulatoropstelling maken de overeenkomst met de werkelijkheid nog groter en verdienen zeker bijkomend onderzoek.

Bijlage A

Matlabscripts van de windmodellen

De matlabscripts voor het genereren van de verschillende windtypes uit Hoofdstuk 4 staan hieronder weergegeven.

A.1 Zwakke, licht variërende wind

```
% ---
        -- Windmodel - Zwakke wind --
%
\% 1. Windparameters
%
\% \ Algemene \ parameters :
t_{eind} = 120;
                         % Duur van de simulatie [s]
t = 0:0.1:t_eind;
\% Gemiddelde windsnelheid:
                           % Maximale gemiddelde windsnelheid [m/s]
v_{gem} = 3;
\%\ Tijdsvariaties in de gemiddelde windsnelheid:
                           \% Maximale to ename / afname winds nelheid [m/s]
A_{hmax} = 1/40;
D_{hmax} = 30;
                           % Maximale duur toename/afname [s]
n_{h} = 40;
                           % Gewenst aantal tijdvariaties in de snelheid
\% Windvlagen:
A_vmax = 0.2;
                           \% Maximale amplitude van de windvlaag [m/s]
D_vmin = 20;
                           % Minimale duur van de windvlaag [s]
                           % Gewenst aantal windvlagen
n_v = 40;
% 2. Berekeningen van verschillende windsnelheden
%
\% Gemiddelde windsnelheid:
v_{-}g = \operatorname{rand}(1) * v_{-}gem;
% Tijdsvariaties in de gemiddelde windsnelheid:
v h = 0:
for i=0:n_h
    A_h = (rand(1) - 1/2) * 2 * A_hmax
    T_{-eh} = rand(1) * t_{-eind}
    T_{sh} = T_{eh}-rand(1)*D_{hmax}
    v_h = v_h + A_h * (t - T_sh) \cdot * heaviside (t - T_sh) - A_h * (t - T_eh) \cdot * heaviside (t - T_eh)
end
% Windvlagen:
v_w = 0;
\mathbf{for} \quad i=0:n_v
    A_v = (rand(1) - 1/2) * 2 * A_vmax
    T_{ev} = rand(1) * t_{eind}
```

```
T_{sv} = T_{ev}-rand (1) * D_vmin
                   D_v = T_ev - T_sv
                    v_{-w} = (0) . * (t < T_{-sv}) + A_{-v} * (1 - \cos(2 . * pi . * (t . / D_{-v} - T_{-sv} / D_{-v}))) . * (T_{-sv} < t \& t < T_{-ev}) + (0) . * (T_{-sv} - T_{-ev}) + (T_{-sv} -
                                      t \ge T_ev
end
\% Totale windsnelheid:
v = v_g + v_h + v_w;
 for i=1:(t_eind*10+1)
                    if v(i)>=0
                                 v(i) = v(i);
                    else
                      v(i) = 0;
                    end
\mathbf{end}
p = plot(t, v, 'LineWidth', 2)
 set (gca, 'FontSize', 18, 'XGrid', 'on', 'YGrid', 'on', 'XLim', [0 120], 'YLim', [0 12], 'Linewidth'
                     , 2)
xlabel('Tijd t [s]', 'Interpreter', 'latex', 'fontsize', 30)
ylabel('Windsnelheid [m/s]', 'Interpreter', 'latex', 'fontsize', 30)
 set(p, 'Color', 'black', 'LineWidth',1);
 ts = timeseries(v, t);
 savefile = 'zwakkewind.mat';
save(savefile, 'ts', '-v7.3')
```

A.2 Matige, turbulente wind

```
% -
         - Windmodel - Matige wind -
%
% 1. Windparameters
%
\% Algemene parameters:
t_{-}eind = 200;
t = 0:0.1:t_eind;
                         % Duur van de simulatie [s]
\% Gemiddelde windsnelheid:
                         \% Maximale gemiddelde windsnelheid [m/s]
v_{gemmax} = 5;
                         \% Minimale gemiddelde windsnelheid [m/s]
v_gemmin = 3;
% Tijdsvariaties in de gemiddelde windsnelheid:
A_{hmax} = 1/160;
                         % Maximale toename/afname windsnelheid [m/s]
                         % Maximale duur toename/afname [s]
D_{\text{hmax}} = 30;
n_{-}h = 35;
                         % Gewenst aantal tijdvariaties in de snelheid
% Windvlagen:
                         % Maximale amplitude van de windvlaag [m/s]
A_vmax = 0.05;
D_vmin = 40;
                         % Minimale duur van de windvlaag [s]
n_v = 35;
                         \% \ Gewenst \ aantal \ windvlagen
% Turbulentie:
                         \% Ruwheidslengte [m]
z_0 = 0.5;
z_2 = 15;
                         % Hoogte van de gondel [m]
L = 20 * z_{-2};
                         % Turbulentieschaal [m]
                         % Maximale frequentiecomponent van turbulentie [Hz]
f_{-max} = 1.5;
```

% 2. Berekeningen van verschillende windsnelheden %-

% Gemiddelde windsnelheid: v_g = rand(1)*(v_gemmax-v_gemmin)+v_gemmin;

% Tijdsvariaties in de gemiddelde windsnelheid: v_h = 0;

```
for i=0:n_h
                 A_{-h} = (rand(1) - 1/2) * 2 * A_{-hmax}
                 T_{eh} = rand(1) * t_{eind}
                 T_sh = T_eh-rand(1)*D_hmax
                  v_h = v_h + A_h * (t - T_{sh}) \cdot * heaviside (t - T_{sh}) - A_h * (t - T_{eh}) \cdot * heaviside (t - T_{eh})
end
% Windvlagen:
 \mathbf{v}_{-}\mathbf{w} = 0;
 for i=0:n_v
                A_v = (rand(1) - 1/2) * 2 * A_vmax
                T_ev = rand(1) * t_eind
                 T_{sv} = T_{ev}-rand (1) * D_vmin
                D_v = T_ev - T_sv
                 v_{-w} = (0) \cdot (t < T_{-sv}) + A_{-v} \cdot (1 - \cos(2 \cdot spi \cdot (t \cdot / D_{-v} - T_{-sv} / D_{-v}))) \cdot (T_{-sv} < t \& t < T_{-ev}) + (0) \cdot (0) \cdot (t - sv - t \& t < T_{-ev}) + (0) \cdot (0) \cdot (t - sv - t \& t < T_{-ev}) + (0) \cdot (0) \cdot (t - sv - t \& t < T_{-ev}) + (0) \cdot (0) \cdot (t - sv - t \& t < T_{-ev}) + (0) \cdot (0) \cdot (t - sv - t \& t < T_{-ev}) + (0) \cdot (0) 
                                 t \ge T_ev
end
\% Turbulentie:
 v_{-}t = 0;
 for i=1:10000
                 delta = f_max/10000
                 f = (i - 1/2) * delta
                S = (1/\log(z_2/z_0)^2 * L * v_gem) . / (1+1.5.*f.*L./v_gem) . (5/3)
                 phi = rand(1) * 2 * pi
                A = sqrt(1/2*delta*S)*sin(phi)
                B = sqrt(1/2*delta*S)*cos(phi)
                  v_t = v_t + 2*(A \cdot * sin(2*pi \cdot * f \cdot * t) + B \cdot * cos(2*pi \cdot * f \cdot * t))
end
\% Totale windsnelheid:
v = v_g + v_h + v_w + v_t;
for i=1:(t_eind*10+1)
                 if v(i) >= 0
                                v(i) = v(i);
                  else
                   v(i) = 0;
                 end
\mathbf{end}
p = plot(t, v, 'LineWidth', 2)
 set (gca, 'FontSize', 18, 'XGrid', 'on', 'YGrid', 'on', 'XLim', [0 200], 'YLim', [0 12], 'Linewidth'
                  , 2)
 xlabel('Tijd t [s]', 'Interpreter', 'latex', 'fontsize', 30)
ylabel('Windsnelheid [m/s]', 'Interpreter', 'latex', 'fontsize',30)
set(p, 'Color', 'black', 'LineWidth',1);
 ts = timeseries(v, t);
 savefile = 'matigewind.mat';
save(savefile, 'ts', '-v7.3')
```

A.3 Krachtige wind met hevige fluctuaties

```
% _____ Windmodel - Krachtige wind _____
% ______
% 1. Windparameters
% ______
% Algemene parameters:
t_eind = 200;
t = 0:0.1:t_eind; % Duur van de simulatie [s]
% Gemiddelde windsnelheid:
v_gemmax = 8; % Maximale gemiddelde windsnelheid [m/s]
v_gemmin = 5; % Minimale gemiddelde windsnelheid [m/s]
% Tijdsvariaties in de gemiddelde windsnelheid:
```

 $A_{\text{hmax}} = 5/40;$ % Maximale toename/afname windsnelheid [m/s] % Maximale duur toename/afname [s] $D_{hmax} = 30;$ % Gewenst aantal tijdvariaties in de snelheid $n_{-}h = 35;$ % Windvlagen: % Maximale amplitude van de windvlaag $[m\!/\!s\,]$ $A_vmax = 1.5;$ $D_vmin = 20;$ % Minimale duur van de windvlaag [s] $n_v = 35;$ % Gewenst aantal windvlagen % Turbulentie: % Ruwheidslengte [m] $z_0 = 0.0001;$ $z_2 = 15;$ % Hoogte van de gondel [m] $L = 20 * z_2;$ % Turbulentieschaal [m] % Maximale frequentiecomponent van turbulentie [Hz] $f_max = 1;$ % 2. Berekeningen van verschillende windsnelheden % % Gemiddelde windsnelheid: $v_{-g} = rand(1) * (v_{-gemmax} - v_{-gemmin}) + v_{-gemmin};$ % Tijdsvariaties in de gemiddelde windsnelheid: $v_{-}h = 0;$ $\mathbf{for} \quad \mathbf{i=}0\!:\!\mathbf{n_{-}h}$ $A_{-h} = (rand(1) - 1/2) * 2 * A_{-hmax}$ $T_{eh} = rand(1) * t_{eind}$ $T_sh = T_eh-rand(1)*D_hmax$ $v_h = v_h + A_h * (t - T_s h) \cdot * heaviside (t - T_s h) - A_h * (t - T_e h) \cdot * heaviside (t - T_e h)$ end % Windvlagen: $v_{-}w = 0;$ for i=0:n_v $A_v = (rand(1) - 1/2) * 2 * A_vmax$ $T_{ev} = rand(1) * t_{eind}$ $T_sv = T_ev-rand(1)*D_vmin$ $D_v = T_ev - T_sv$ $v_{-w} = (0) \cdot (t < T_{-sv}) + A_{-v} \cdot (1 - \cos(2 \cdot spi \cdot (t \cdot / D_{-v} - T_{-sv} / D_{-v}))) \cdot (T_{-sv} < t \& t < T_{-ev}) + (0) \cdot (0) \cdot (t - sv - t \& t < T_{-ev}) + (0) \cdot (0) \cdot (t - sv - t \& t < T_{-ev}) + (0) \cdot (0) \cdot (t - sv - t \& t < T_{-ev}) + (0) \cdot (0) \cdot (t - sv - t \& t < T_{-ev}) + (0) \cdot (0)$ $t \ge T_ev$) end % Turbulentie: $v_{-}t = 0;$ for i=1:10000 $delta = f_max/10000$ f = (i - 1/2) * delta $S = (1/\log(z_2/z_0)^2 * L * v_gem) . / (1+1.5.*f.*L./v_gem) . (5/3)$ phi = rand(1) * 2 * piA = sqrt(1/2*delta*S)*sin(phi)B = sqrt(1/2*delta*S)*cos(phi) $v_{-}t = v_{-}t + 2*(A_{\cdot}*sin(2*pi_{\cdot}*f_{\cdot}*t_{\cdot})+B_{\cdot}*cos(2*pi_{\cdot}*f_{\cdot}*t_{\cdot}))$ end % Totale windsnelheid: $v = v_{g}+v_{h}+v_{v}+v_{t};$ **for** i=1:(t_eind*10+1) **if** v(i)>=0 v(i) = v(i);else v(i) = 0;end end p = plot(t, v, 'LineWidth', 2)set (gca, 'FontSize', 18, 'XGrid', 'on', 'YGrid', 'on', 'XLim', [0 200], 'YLim', [0 12], 'Linewidth' ,2) xlabel('Tijd t [s]', 'Interpreter', 'latex', 'fontsize', 30) ylabel('Windsnelheid [m/s]', 'Interpreter', 'latex', 'fontsize', 30) set(p, 'Color', 'black', 'LineWidth',1);

```
ts = timeseries(v,t);
savefile = 'krachtigewind.mat';
save(savefile, 'ts', '-v7.3')
```

A.4 Storm

```
% ---
            ----- Windmodel - Storm ----
%
% 1. Windparameters
%
% Algemene parameters:
t_{-}eind = 200;
t = 0:0.1:t_eind;
                                                            % Duur van de simulatie [s]
% Gemiddelde windsnelheid:
                                                            \% Maximale gemiddelde windsnelheid [m/s]
v_{gemmax} = 10;
                                                            \% Minimale gemiddelde windsnelheid [m/s]
v_gemmin = 8;
% Tijdsvariaties in de gemiddelde windsnelheid:
A_{hmax} = 6/40;
                                                            % Maximale toename/afname windsnelheid [m/s]
D_{hmax} = 30;
                                                            % Maximale duur toename/afname [s]
n_{-}h = 35;
                                                            % Gewenst aantal tijdvariaties in de snelheid
% Windvlagen:
                                                            % Maximale amplitude van de windvlaag [m/s]
A_vmax = 2;
D_vmin = 20;
                                                            % Minimale duur van de windvlaag [s]
n_v = 35;
                                                            \% Gewenst aantal windvlagen
\% Turbulentie:
z_{-}0 = 1;
                                                            % Ruwheidslengte [m]
z_2 = 15;
                                                            % Hoogte van de gondel [m]
L = 20 * z_2;
                                                            % Turbulentieschaal [m]
                                                            % Maximale frequentiecomponent van turbulentie [Hz]
f_max = 2;
\% 2. Berekeningen van verschillende windsnelheden
%-
\%\ Gemiddelde\ windsnelheid:
v_{g} = rand(1) * (v_{gemmax} - v_{gemmin}) + v_{gemmin};
\%\ Tijds variaties in de gemiddelde winds nelheid:
v_{-}h = 0;
\mathbf{for} \quad i=\!0\!:\!n\_h
          A_h = (rand(1) - 1/2) * 2 * A_hmax
          T_{-eh} = rand(1) * t_{-eind}
          T_{sh} = T_{eh} - rand(1) * D_{hmax}
          v_h = v_h + A_h * (t - T_sh) \cdot * heaviside (t - T_sh) - A_h * (t - T_eh) \cdot * heaviside (t - T_eh)
\mathbf{end}
% Windvlagen:
v_w = 0;
for i=0:n_v
          A_v = (rand(1) - 1/2) * 2 * A_vmax
          T_{ev} = rand(1) * t_{eind}
          T_sv = T_ev-rand(1)*D_vmin
          D_v = T_ev - T_sv
          v_{-w} = (0) . * (t < T_{-sv}) + A_{-v} * (1 - \cos(2 . * pi . * (t . / D_{-v} - T_{-sv} / D_{-v}))) . * (T_{-sv} < = t \& t <= T_{-ev}) + (0) . * (t < T_{-sv} - T_{-sv} / D_{-v})) . * (T_{-sv} < = t \& t < = T_{-ev}) + (0) . * (t < T_{-sv} - T_{-sv} / D_{-v})) . * (T_{-sv} < = t \& t < = T_{-ev}) + (0) . * (t < T_{-sv} / D_{-v}) . * (t < T_{-sv} / D_{-v})) . * (T_{-sv} < = t \& t < = T_{-ev}) + (0) . * (t < T_{-sv} / D_{-v}) . * (t < T_{-sv} / D_{-v})) . * (T_{-sv} < = t \& t < = T_{-ev}) + (0) . * (t < T_{-sv} / D_{-v}) . * (t < T_{
                   t \ge T_ev
end
% Turbulentie:
v_{-}t = 0;
for i=1:10000
          delta = f_{max}/10000
```

```
f = (i - 1/2) * delta
     S = (1/\log(z_2/z_0)^2 * L * v_g) . / (1+1.5.*f.*L./v_g) . (5/3)
     phi = rand(1) * 2 * pi
     A = sqrt(1/2*delta*S)*sin(phi)
     B = sqrt(1/2*delta*S)*cos(phi)
      v_{t} = v_{t} + 2*(A.*sin(2*pi.*f.*t)+B.*cos(2*pi.*f.*t))
\mathbf{end}
\% Totale windsnelheid:
v \;=\; v_{-}g{+}v_{-}h{+}v_{-}w{+}v_{-}t\;;
for i=1:(t_eind*10+1)
     if v(i)>=0
         v(i) = v(i);
      else
      v(i) = 0;
     end
\mathbf{end}
p = \mathbf{plot}(t, v, 'LineWidth', 2)
set (gca, 'FontSize', 18, 'XGrid', 'on', 'YGrid', 'on', 'XLim', [0 200], 'YLim', [0 12], 'Linewidth'
      ,2)
xlabel('Tijd t [s]', 'Interpreter', 'latex', 'fontsize', 30)
ylabel('Windsnelheid [m/s]', 'Interpreter', 'latex', 'fontsize', 30)
set(p, 'Color', 'black', 'LineWidth', 1);
ts = timeseries(v, t);
savefile = 'storm.mat';
{\bf save}\,(\,{\tt savefile}\ ,\,\,{\tt 'ts}\ '\,,\,{\tt '-v7.3}\ ')
```

Bijlage B Versterkerschakeling

De uitgang van de DSP is een PWM-signaal met hoge frequentie. De minimale uitgangsspanning is 0 V, de maximale spanning 3,3 V. Door de duty ratio van het PWM-signaal te veranderen, kunnen alle spanningen tussen 0 V en 3,3 V worden bekomen, als men tenminste het gemiddelde beschouwt. Door gebruik te maken van de geschikte filters en een versterkerschakeling krijgt men een analoge uitgangsspanning die varieert tussen 0 V en 10 V. Het is deze spanning die als ingang dient van de vermogenomvormer. Om het signaal te filteren en te versterken wordt gebruik gemaakt van onderstaande schakeling.



Figuur B.1: Filter- en versterkerschakeling.

Het PWM-signaal afkomstig van de DSP heeft een schakelfrequentie van 10 kHz. De filters hebben als doel deze blokgolf om te zetten in een quasi-gelijkspanning door de hoogfrequente componenten weg te filteren. Hiervoor worden twee passieve RC-filters met verschillende afsnijfrequentie na elkaar geplaatst. Aangezien de analoge ingang van de vermogenomvormer een bandbreedte heeft van 100 Hz, wordt de afsnijfrequentie van de laatste filter hoger gekozen dan 100 Hz.

B.1 Filter 1

Voor de eerste RC-filter is een afsnijfrequentie van 400 Hz gewenst. De uitdrukking voor de afsnijfrequentie van dit type filter luidt:

$$f_{\rm cutoff_1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \tag{B.1}$$



Figuur B.2: Eerste-orde filter.

Voor het product van R_1 en C_1 wordt dus volgende uitdrukking bekomen:

$$R_1 C_1 = \frac{1}{2\pi f_{\text{cutoff}_1}} = \frac{1}{2\pi \cdot 400 \, Hz} \approx 3,9789 \cdot 10^{-4} \, s \tag{B.2}$$

Om de stromen in het circuit zoveel mogelijk te beperken, dienen de gebruikte weerstanden hoog genoeg gekozen te worden. Voor de weerstand R_1 wordt 3900 Ω genomen. De best passende waarde voor C_1 bedraagt dan 100 nF. De exacte afsnijfrequentie van deze filter bij de gekozen waarden voor R_1 en C_1 is nu:

$$f_{\rm cutoff_1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \approx 408,09 \, Hz \tag{B.3}$$

B.2 Filter 2

Voor de tweede filter kan dezelfde werkwijze gevolgd worden ter bepaling van de weerstand R_2 en capaciteit C_2 . Nu wordt een afsnijfrequentie van 200 Hz vooropgesteld. Er wordt opnieuw gebruik gemaakt van dezelfde uitdrukking voor de afsnijfrequentie:

$$f_{\rm cutoff_2} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \tag{B.4}$$

Voor het product van R_2 en C_2 wordt dus volgende uitdrukking bekomen:

$$R_2 C_2 = \frac{1}{2\pi f_{\text{cutoff}_2}} = \frac{1}{2\pi \cdot 200 \, Hz} \approx 7,9577 \cdot 10^{-4} \, s \tag{B.5}$$

Voor de weerstand R_2 wordt 5600 Ω gekozen, uit de beschikbare condensatoren levert een capaciteit van 150 nF voor C_2 het beste resultaat. De exacte afsnijfrequentie van de tweede filter wordt:

$$f_{\text{cutoff}_2} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \approx 189,47 \, Hz$$
 (B.6)

Door twee eerste-orde filters na elkaar te plaatsen wordt een tweede-orde filter bekomen. Dit is nodig om de rimpel in de uitgangsspanning voldoende klein te houden, wat met één filter niet mogelijk is.

B.3 Niet-inverterende versterker

De uitgangsspanning van de DSP kan slechts variëren tussen 0 V en 3,3 V, waar het bereik van de analoge ingang van de vermogensomvormer loopt van 0 V tot 10 V. Indien er geen gebruik wordt gemaakt van een versterkerschakeling zou men slechts een derde van het bereik benutten, wat de resolutie niet ten goede komt. Daarom wordt er geopteerd om de gefilterde spanning te versterken. Hiervoor wordt van de niet-inverterende versterkerschakeling gebruik gemaakt, die in Figuur B.3 voorgesteld wordt.



Figuur B.3: Niet-inverterende versterkerschakeling.

De schakeling bestaat uit een operationele versterker (of opamp) van het type UA741. Om een uitgangsspanning tussen 0 V en 10 V te bekomen, dient de opamp gevoed te worden met een spanning van minstens 10 V aan de V_+ -klem en -10 V aan de V_- -klem. Er wordt gekozen voor een **TDK-Lambda** dubbelzijdige voeding van 12V. Daarnaast wordt de uitgang via een weerstand teruggekoppeld aan de negatieve ingangsklem en is deze op haar beurt via een tweede weerstand met de aarde verbonden. De te versterken spanning wordt aan de positieve ingangsklem aangeboden en komt versterkt op de uitgangsklem terecht. Om de weerstanden R_3 en R_4 te bepalen, wordt er gebruik gemaakt van enkele eigenschappen van de opamp, zie [41]. De spanning aan de positieve ingangsklem dient altijd gelijk te zijn aan deze aan de negatieve ingangsklem. De schakeling krijgt dus volgende eenvoudige vorm:



Figuur B.4: Analyse van niet-inverterende versterkerschakeling.

We vinden onmiddellijk volgende uitdrukkingen:

$$V_{\rm in} = R_3 I \tag{B.7}$$

$$V_{\rm uit} = (R_3 + R_4)I \tag{B.8}$$

Hieruit volgt voor de versterkingsfactor A:

$$A = \frac{V_{\rm uit}}{V_{\rm in}} = 1 + \frac{R_4}{R_3}$$
(B.9)

Daar de verhouding van de uitgangsspanning (10 V) tot de ingangsspanning (3,3 V) drie bedraagt, dienen R_3 en R_4 zodanig gekozen te worden dat A gelijk is aan 3. Dit komt neer op een weerstandswaarde van R_4 die het dubbele is van deze van R_3 . Voor R_3 wordt een weerstand van 3900 Ω gekozen, deze van R_4 bedraagt 7800 Ω .

B.4 Simulatie in PSpice

Om de werking van het circuit te testen vooraleer over te gaan tot de praktische uitvoering, is het handig om de schakeling eerst te simuleren. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van het simulatieprogramma PSpice. Het ingevoerde schema ziet er uit zoals te zien in Figuur B.5. De ingangsspanning is een blokgolf. De weerstand van $10 k\Omega$ is de inwendige weerstand van de ingangsklem van de vermogenomvormer.



Figuur B.5: Schema in PSpice.

De simulaties leveren bevredigende resultaten op. Een voorbeeld van een simulatie bij een PWM-signaal met een duty ratio van 50 % geeft de spanningsvormen uit Figuur B.6. De ingangspanning is inderdaad een blokgolf die gedurende de helft van de tijd 3,3 V levert en de overige duur van de periode bedraagt de spanning 0 V. Zoals verwacht is de uitgangsspanning gelijk aan 5 V.

B.5 Controlemeting

Eens de versterkerschakeling gemaakt is, wordt een controlemeting uitgevoerd om de correcte werking van het circuit na te gaan. Bij deze test verbindt men de ingang van de schakeling met een pin van de DSP waarop een variabel PWM-signaal aangelegd kan worden. De voeding



Figuur B.6: Simulatieresultaat in PSpice.

van de schakeling gebeurt met een dubbelzijdige spanningsbron van 15 V. De uitgang van de schakeling wordt verbonden met de analoge ingang van de vermogenomvormer. Vervolgens wordt de duty ratio van het PWM-signaal gevarieerd en de overeenkomstige uitgangsspanning van de schakeling gemeten. De resultaten van deze meting zijn te zien in Figuur B.7. Zoals uit de figuur



Figuur B.7: Meting van de uitgangspanning van de versterkerschakeling.

blijkt, varieert de uitgangspanning V_{uit} lineair met de aangelegde duty ratio δ . Bovendien is de spanning bij maximale duty ratio gelijk aan 9,96 V, wat aangeeft dat de schakeling inderdaad de ingangsspanning drie maal versterkt. Dit is het gewenste gedrag van de schakeling.

Bijlage C

Communicatie tussen de encoder en de DSP

C.1 Probleemstelling

De absolute encoder vormt een belangrijk onderdeel van de emulatoropstelling. Om het turbinekoppel $T_{\rm t}$, het tandwielkastcompensatiekoppel $T_{\rm tand}$, het inertiecompensatiekoppel $T_{\rm in}$ en de invloed van torenschaduw en windschering te kunnen berekenen, is het van belang om de positie, snelheid en versnelling te kennen. De encoder moet dus in staat zijn om met de DSP te communiceren. De positie wordt door middel van een Gray code door de encoder uitgestuurd. Hiervoor dient er wel een kloksignaal aangelegd te worden. De DSP beschikt echter niet over de correcte interface om met de encoder te communiceren. De oplossing voor dit probleem wordt hier verder uitgewerkt.

C.2 SSI

De encoder maakt gebruikt van de SSI-standaard (Synchronous Serial Interface) om de positiedata door te sturen. SSI is gebaseerd op RS-422 en is een vorm van synchrone seriële communicatie [42]. Dit betekent dat de data gesynchroniseerd met een kloksignaal wordt verzonden. Bovendien worden zowel het kloksignaal als het datasignaal door middel van differentiële signalen verstuurd. Door gebruik te maken van getwiste kabels vertoont het systeem een hoge weerstand tegen elektromagnetische interferentie (EMI). Het werkingsprincipe wordt getoond in Figuur C.1. De *master* moet twee kloksignalen sturen: een positief kloksignaal en een negatief



Figuur C.1: Werkingsprincipe van SSI.

(tegengesteld) kloksignaal. De *slave*, in dit geval de encoder, antwoordt met een positief datasignaal en een negatief datasignaal, gesynchroniseerd met het kloksignaal. De DSP is echter niet in staat om met differentiële signalen te werken. Daarom wordt er gebruik gemaakt van een tranceiver, de MAX488, die het kloksignaal afkomstig van de DSP omzet in een differentieel



Figuur C.3: Ideaal tijdsdiagram bij SSI.

signaal en het differentieel signaal van de encoder samenvoegt tot een enkelvoudig signaal. Het communicatieschema ziet er dan uit zoals in Figuur C.2. Door het gebruik van de tranceiver dient de DSP enkel een kloksignaal uit te zenden en synchroon met de klokpulsen data in te lezen. In Figuur C.3 staat een ideaal SSI tijdsdiagram voorgesteld. De tijdsduur $t_{\rm m}$ stelt de transfer timeout voor. Dit is de tijd die de encoder nodig heeft om vast te stellen dat de datatransfer afgelopen is. De tijd $t_{\rm p}$ wordt de tijdsvertraging tussen twee opeenvolgende kloksequenties genoemd. De tijd T is gekend als de klokperiode. De klokfrequentie neemt een waarde aan tussen 50 kHz en 2 MHz.

Wanneer er geen data worden verzonden, zijn zowel de kloklijn als de datalijn 'hoog' (dit komt overeen met een spanning van $\approx 3,3$ V). Dit vormt onmiddellijk een controle op de correcte aansluiting van de encoder. Blijft de datalijn toch 'laag' (dit komt overeen met een spanning van ≈ 0 V) bij een hoge kloklijn, dan wijst dit op een foute aansluiting of een slecht contact.

De communicatie start met de eerste dalende klokflank. Op dit moment wordt de positieinformatie van de encoder constant gehouden en blijft de datalijn nog steeds hoog. Bij de eerste stijgende klokflank wordt gestart met de datatransfer door de MSB (Most Significant Bit) te verzenden. Bij elke stijgende klokflank zal er nu een bit van de positie-informatie worden verstuurd. Tot slot wordt de LSB (Least Significant Bit) doorgestuurd. Hierna wordt een bijkomende stijgende klokflank gebruikt om de kloklijn weer hoog te maken, terwijl de datalijn laag blijft. Deze blijft laag gedurende de tijdsduur t_m . Nadat deze tijd voorbij is wordt de datalijn opnieuw hoog en wordt de positie-informatie continu geüpdated. Bij een nieuwe trein van klokpulsen zal het bovenstaande proces zich herhalen. Voor een singleturn encoder (zoals in de emulator het geval is) wordt de positie-informatie verzonden als een 13-bit datawoord.

C.3 Gray code

Om de data door te sturen, maakt de encoder gebruik van de Gray code. Deze code wordt vaak aangewend in encoders aangezien er bij de overgang tussen twee posities slechts één bit van de code wijzigt [43]. Dit maakt het makkelijker om fouten op te sporen. In Figuur C.4 is een eenvoudig voorbeeld van deze code te zien bij een 4-bit datawoord. De encoder heeft een resolutie van 8192 posities per omwenteling, wat overeenkomt met 13 bits data.

De ingelezen positie is dus Gray code. Om de positie te kunnen gebruiken in het DSP-programma moet deze omgezet worden in een decimaal getal. Hiertoe wordt de Gray code eerst omgezet in een binair getal dat vervolgens eenvoudig in een decimaal getal kan omgezet worden. Het logisch circuit om Gray code in een binair getal om te zetten staat weergegeven in Figuur C.5. De logische formule leent zich uitstekend tot implementatie in de DSP.

C.4 Communicatie in de opstelling

Nu de eigenschappen van SSI en de Gray code gekend zijn, kan de communicatie op de DSP geïmplementeerd worden. Hiervoor wordt er gebruik gemaakt van de PWM-module die op de DSP aanwezig is. Er wordt een PWM-signaal met een frequentie van 100 kHz ingesteld. Bij een duty ratio van 50 % geeft dit het gewenste kloksignaal, bij een duty ratio van 100 % wordt de kloklijn 'hoog'. De pulsen worden gecentreerd in de PWM-periode. Halverwege de puls wordt er telkens een interrupt aangeroepen die het kloksignaal genereert. De totale communicatieperiode bedraagt 340 μ s. Er zijn vijftien klokpulsen aanwezig waarvan de eerste dertien pulsen dienen om de positie door te sturen. Vervolgens wordt de kloklijn 'hoog' gehouden tot de volgende kloksequentie wordt gegenereerd. Door in dezelfde interrupt die het kloksignaal genereert ook onmiddellijk de databits in te lezen, bekomt men de perfecte synchronisatie tussen het kloksignaal en het datasignaal.

In Figuur C.6 zijn het werkelijke klok- en datasignaal tussen de DSP en de encoder te zien. Het lage ruisniveau op beide signalen valt onmiddellijk op. Dit is het gevolg van het gebruik van de differentiële signalen. Op Figuur C.6 is de *transfer timeout* t_m duidelijk zichtbaar. Na de laatste stijgende klokflank blijft de datalijn nog gedurende 21 μ s laag. Vervolgens wordt de datalijn opnieuw hoog en is de encoder opnieuw klaar om een nieuwe positie door te sturen naar de DSP.



Figuur C.4: Voorbeeld van Gray code.



Figuur C.5: Omzetting van Gray code naar een binair getal.

Zoals verwacht, blijft de datalijn na de eerste dalende klokflank hoog. De communicatie start pas bij de eerste stijgende klokflank. Het is belangrijk om op te merken dat de informatie op de datalijn een klein beetje na-ijlt op het kloksignaal. De bitovergang op de datalijn is een fractie later dan de stijgende klokflank. Daarom wordt er besloten om de informatie in te lezen op de helft van de positieve klokpuls. Op dat moment zijn de data stabiel en bestaat er geen gevaar op een foute positiemeting door de bitovergang.



Figuur C.6: Het werkelijke klok- en datasignaal bij de communicatie tussen encoder en DSP.

Bijlage D DSP-code

De DSP wordt geprogrammeerd in C. Hieronder staat de volledige code weergegeven die instaat voor de emulatie van de windturbine. De code bestaat uit drie grote blokken: de 'main'-fucntie en twee 'interrupts'. In de 'main'-functie wordt de DSP geïnitialiseerd. De interrupt 'cpu_timer0_isr' staat in voor alle belangrijke berekeningen, zoals het turbinekoppel, compensatiekoppel, ... De interrupt 'ePWM1A_compare_isr' verzorgt de communicatie met de encoder.

Onderaan de broncode zijn er nog heel wat andere functies terug te vinden. Deze functies worden gebruikt bij het initialiseren van de DSP of bij de berekeningen in de twee interrupts. Hun functie wordt toegelicht in de commentaar van de code.

Het is ook nog belangrijk om te vermelden dat er verschillende header-bestanden en bijkomende c-bestanden nodig zijn om de DSP correct te laten functioneren (bv. om de interrupts in te stellen). Deze worden hier echter niet gegeven.

______ 1 Windturbine-emulator Academiejaar 2011-2012 Jan Van de Vyver ______ **#include** "DSP2833x_Device.h" **#include** "IQmathLib.h" **#include** "DSP2833x_SWPrioritizedIsrLevels.h" Declaration of constants Clockfrequency [Hz] #define CLOCKFREQ 100000 #define PI 3.1415926535 // Definiton of pi Density of air $[kg/(m^3)]$ Turbine inertia $[kgm^2]$ #define RHO 1.225 #define JT 2.07 // Motor inertia [kgm^2] #define JM 0.0045 #define R 1.365 Rotor radius [m] #define MAXTORQUE 34.9 // Maximum torque value [Nm] #define MINTORQUE 0 // Minimum torque value [Nm] #define GEARRATIO 3.49 // Gear ratio // Prototype statements for functions found within this file. void Gpio_select(void); void Setup_ePWM1(void); void DutyRatioToCPMA(double duty); extern void InitSysCtrl(void); extern void InitPieCtrl(void); extern void InitPieVectTable(void); extern void InitCpuTimers(void); extern void ConfigCpuTimers(struct CPUTIMER_VARS*, float, float);

```
interrupt void cpu_timer0_isr(void);
interrupt void ePWM1A_compare_isr(void);
int Power(int m, int n);
double GrayToPosition(int graycode[17]);
double PositionToVelocity(double position, double positionold);
double TurbineTorque(double windspeed, double angularshaftspeed);
double TorqueToDutyRatio(double torque);
// Declaration of variables
                                     // Duty ratio
// Angular velocity [rated value 2*PI*415/60]
double delta = 0;
double omega = 0;
                                     // Wind speed
double v = 8.585;
double Tt = 0;
double Tgear = 0;
                                     // Turbine torque
// Gearbox compensation torque
double Tin = 0;
                                     // Inertia compensation torque
double position;
                                     // Encoder position value
double angular position old = 0;
double angular position = 0;
double omega1 = 0;
double omega2 = 0;
double a = 0;
double a1 = 0;
double a2 = 0;
double y = 0;
double y1 = 0;
double y_2 = 0;
double theta = 0;
double tower = 0;
double tower 2 = 0;
double tower 3 = 0;
double theta 2 = 0;
double theta 3 = 0;
double omegabuffer = 0;
double v1 = 0;
                                     // Modulated wind speed
double velocity [10];
double omegadata [1900];
                                     // Array to save omega measurements
int save = 0;
int i = 0;
int theta 1 = 0;
                                     // Counter to read gray code
int datacounter = 0;
                                     // Counter to save data
int savecounter = 0;
// Array contains gray code
_____
                                   Main function
void main(void)
{
       /*
              The initialization of the DSP is done in the the main function. */
       InitSysCtrl();
                                            // Basic Core Initialization
       EALLOW:
       SysCtrlRegs.WDCR=0x00AF;
       EDIS;
       DINT;
                                            // Disable all interrupts
       Gpio_select();
                                            // Setup Gpio's
       Setup_ePWM1();
                                            // Setup PWM
       DutyRatioToCPMA(delta);
                                            // Setup initial duty ratio
       InitPieCtrl();
                                            // Setup interrupts
       InitPieVectTable();
       EALLOW;
       PieVectTable.TINT0=&cpu_timer0_isr;
```

```
PieVectTable.EPWM1_INT = &ePWM1A_compare_isr;
       EDIS;
       InitCpuTimers();
                                             // Initialization of timers
       ConfigCpuTimer(&CpuTimer0, 150, 3400); // Interrupt called every 3400 ms
       // Enable TIMERO INT in the PIE: Group 1 interrupt 7
       PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx7 = 1;
       // Enable EPWM1A INT in the PIE: Group 3 interrupt 1
       PieCtrlRegs.PIEIER3.bit.INTx1 = 1;
                                             // Enable INT1 for Timer0
       IER |=1;
                                             // Enable INT3 for ePWM1
       IER =4:
       EINT;
       ERTM;
       CpuTimer0Regs.TCR.bit.TSS = 0;
                                             // Start timer0
       while(1)
       {
              EALLOW:
                                           // Service WD #1
               SysCtrlRegs.WDKEY = 0x55;
               EDIS;
       }
}
Interrupt 1
interrupt void cpu_timer0_isr(void)
{
               In interrupt 1 the calculations to emulate a wind turbine correctly
       /*
               are carried out. This interrupt is called every 3400 ms. */
       volatile Uint16 TempPIEIER = PieCtrlRegs.PIEIER1.all;
       IER \mid = M_{INT1};
                                             // Set "global" priority
       IER &= MINT1;
       PieCtrlRegs.PIEACK.all = 0xFFFF;
                                             // Enable PIE interrupts
       omega = omegabuffer;
                                             // Save omega in buffer variable
       y = 22*(\text{omega1-omega2})+0.922*y1-0.004339*y2; // Calculate acceleration
       // Filter acceleration
       a = 0.0005588 * y1 + 0.0005401 * y2 + 1.902 * a1 - 0.903 * a2;
       omega2 = omega1;
       omega1 = omega;
       y2 = y1;
       y_1 = y;
       a2 = a1;
       a1 = a:
       // Calculate theta
       theta2 = theta2 + omega * 0.0034;
       theta3 = (3.0/2.0) * theta2;
       theta1=theta3 /(2.0*PI);
       theta=theta3-theta1*2.0*PI;
       EINT;
                                             // Enable interrupts
       EALLOW;
       SysCtrlRegs.WDKEY = 0xAA;
                                             // Service WD #2
       EDIS;
       // Calulate modulated wind speed due to tower shadow and wind shear
       tower = (\_IQtoF(\_IQsin(\_IQ(theta))));
       tower2=tower*tower;
       tower3 = (96.0 + 4.0 * tower2) / 100.0;
       v1=v*tower3;
```

```
Tt = TurbineTorque(v1, omega);
                                              // Calculate turbine torque
       Tgear = 0.02843 * omega * 3.49;
                                              // Calculate gearbox compensation torque
       Tin = (JM*GEARRATIO*GEARRATIO-JT)*a;
                                              // Calculate inertia compensation torque
       delta = TorqueToDutyRatio(Tt+Tgear+Tin); // Calculate duty ratio
                                              // Set duty ratio in PWM-register
       DutyRatioToCPMA(delta);
       // Save omega to data array
       if (save < 29)
       {
               save++:
       }
       else if (save==29)
       {
               omegadata [savecounter] = theta;
               savecounter++;
               save = 0:
       }
       PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;
                                              // Disable interrupts
       DINT;
       PieCtrlRegs.PIEIER1.all = TempPIEIER;
}
Interrupt 2
interrupt void ePWM1A_compare_isr(void)
ł
               This interrupt runs every 10 us (PWM-frequency = CLOCKFREQ)
       /*
               and is triggered by an ePWM1 compare event. It is used to communicate
               with the encoder. On channel ePWM1A a clocksignal is generated. The
               clocksignal lasts 17 PWM-periods. Then the line is held high for
               another 17 PWM-periods. The data is read on the half of a high clock-
               pulse and stored.*/
       DINT;
                                              // Disable interrupts
       EALLOW:
       SysCtrlRegs.WDKEY = 0xAA;
                                              // Service watchdog #2
       EDIS;
       if (datacounter <=16)
       ł
               data[datacounter]=GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIO3;
               datacounter++;
       }
       else if ((datacounter >16)&&(datacounter <33))
       {
               EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 0;
               datacounter++;
       else if(datacounter==33)
               angularposition = GrayToPosition(data);
               velocity [0] = Position To Velocity (angular position, angular position old);
               angularpositionold = angularposition;
               omegabuffer = (omegabuffer+velocity[0]+velocity[1]+velocity[2]+velocity
                   [3]+velocity[4]+velocity[5])/7.0;
               velocity [5] = velocity [4];
               velocity [4] = velocity [3];
               velocity [3] = velocity [2];
               velocity[2] = velocity[1];
velocity[1] = velocity[0];
               EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = EPwm1Regs.TBPRD/2;
```

```
datacounter = 0;
       }
                                              // Clear ePWM1 Interrupt flag
       EPwm1Regs.ETCLR.bit.INT = 1;
       // Acknowledge this interrupt to receive more interrupts from group 3
       PieCtrlRegs.PIEACK.all = 4;
       EINT;
                                              // Enable interrupts
}
Initialization functions
void Gpio_select(void)
ł
               This function initializes the different pins. */
       EALLOW:
        // Initialision multiplex register to digital I/O
                                              // GPIO15-GPIO0 = General Puropse I/O
        GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all = 0;
                                              // ePWM1A active
       GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO0 = 1;
       GpioCtrlRegs.GPAMUX1. bit.GPIO1 = 1;
                                              // ePWM1B active
        GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO4 = 1;
                                              // ePWM3A active
                                              // ePWM3B active
        GpioCtrlRegs.GPAMUX1. bit.GPIO5 = 1;
                                              // GPI031-GPI016 = General Purpose I/O
        GpioCtrlRegs.GPAMUX2.all = 0;
                                              // GPIO47-GPIO32 = General Purpose I/O
        GpioCtrlRegs.GPBMUX1.all = 0;
                                              // GPIO63-GPIO48 = General Purpose I/O
       GpioCtrlRegs.GPBMUX2.all = 0;
                                              // GPI079-GPI064 = General Purpose I/O
       GpioCtrlRegs.GPCMUX1.all = 0;
       GpioCtrlRegs.GPCMUX2.all = 0;
                                              // GPI087-GPI080 = General Purpose I/O
        GpioCtrlRegs.GPADIR.all = 0;
       GpioCtrlRegs.GPBDIR.all = 0;
                                              // GPIO63-32 as inputs
                                              // GPIO87-64 as inputs
        GpioCtrlRegs.GPCDIR.all = 0;
       EDIS;
}
void Setup_ePWM1(void)
ł
        /*
               This function sets up the registers for the PWM-signals. */
        /*
               The ePWM1-signal is used to communicate with the encoder. */
                                              // CLKDIV = 1// HSPCLKDIV = 2
       EPwm1Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = 0;
       EPwm1Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = 1;
       EPwm1Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = 2;
                                              // up - down mode
       EPwm1Regs.AQCTLA.all = 0x0060;
       EPwm1Regs.AQCTLB.all = 0x0600;
       EPwm1Regs.TBPRD = 375;
                                               // 100KHz - PWM signal
       EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = EPwm1Regs.TBPRD/2;
       EPwm1Regs.CMPB = EPwm1Regs.TBPRD/2;
       EPwm1Regs.ETSEL.all = 0;
       EPwm1Regs.ETSEL.bit.INTEN = 1;
                                              // interrupt enable for ePWM1
// interrupt on half of the high pulse
       EPwm1Regs.ETSEL.bit.INTSEL = 2;
                                              // interrupt on first event
       EPwm1Regs.ETPS.bit.INTPRD = 1;
               The ePWM3-signal is used to communicate with the powerconverter. */
                                             // CLKDIV = 1
// HSPCLKDIV = 2
// up - down mode
       EPwm3Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = 0;
       EPwm3Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = 1;
       EPwm3Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = 2;
       EPwm3Regs.AQCTLA.all = 0x0060;
       EPwm3Regs.AQCTLB.all = 0x0600;
       EPwm3Regs.TBPRD = 3750;
                                              // 10KHz - PWM signal
       EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = 0;
       EPwm3Regs.CMPB = EPwm3Regs.TBPRD/2;
}
```

```
______
                                                                                    Other functions
_____
double GrayToPosition(int graycode[17])
                  /*
                                     This function converts the gray code into a binary code.
                                     Afterwards the binary code is converted into an angular position.
                                     The angular position has a range from 0 to 2*PI. */
                  int binarycode[13];
                  int i,j;
                  double decimal = 0;
                  double angularposition;
                  binarycode[0] = graycode[3];
                  for (i=1;i<13;i++)
                  {
                                     binarycode[i] = (binarycode[(i-1)]^graycode[i+3]);
                  }
                  for (j=0;j<13;j++)
                  {
                                     decimal = decimal+Power(2,(12-j))*binarycode[j];
                  }
                  angularposition = (decimal * (2.0 * PI/8192.0));
                  return angular position;
}
int Power(int base, int n)
ł
                                     This function calculates the power n of the base. */
                  /*
                  int z;
                  int p = 1;
                  for (z=1;z<=n;z++)
                  ł
                                     p = p * base;
                  return p;
}
double Position ToVelocity (double angular position, double angular positionold)
ł
                                     This function calculates the angular velocity.
                  /*
                                     The inputs are an old angular position and a new one. */
                  double angularvelocity=0;
                  if (angular position < angular position old )
                   {
                                     angularvelocity = (angularposition - (angularpositionold - 2.0*PI))*(
                                             CLOCKFREQ/(34.0*GEARRATIO));
                  }
                  else
                  {
                                     angularvelocity = (angularposition - angularpositionold) * (CLOCKFREQ/(34.0 * CLOCKFREQ)) + (CLOCKFREQ) + (CLOCK
                                             GEARRATIO));
                  }
                  return angularvelocity;
}
void DutyRatioToCPMA(double duty)
                                     This function converts the duty ratio into the according CMPA-value
                  /*
                                     for the PWM-register.
```

```
The variable 'duty' has a range from 0 to 100. */
       EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = EPwm3Regs.TBPRD - (duty/100.0)*EPwm3Regs.TBPRD;
}
double TurbineTorque(double windspeed, double angularshaftspeed)
ł
               This function calculates the Turbine Torque in function of the
       /*
               windspeed and angular shaftspeed. */
       double Torque;
       double cp;
       double lambda = (R*angularshaftspeed)/windspeed;
       _iq power = _IQ(-18.4/lambda+0.055);
       _iq Cp1;
       Cp1 = 0.73 * (151 / lambda - 13.65) * (_IQexp(power));
       cp = IQtoF(Cp1);
       Torque = (cp*RHO*PI*R*R*windspeed*windspeed*windspeed)/(2*angularshaftspeed);
       return Torque;
}
double TorqueToDutyRatio(double torque)
{
               This function converts the calculated torque into a duty ratio. */
       /*
       double dutyratio;
       if((torque <= MAXTORQUE) && (torque >= MINTORQUE))
       {
               dutyratio = (torque/MAXTORQUE) *100.0;
       }
       else if (torque >= MAXTORQUE)
       {
               dutyratio = 100.0;
       }
       else if (torque <= MINTORQUE)
       {
               dutyratio = 0.0;
       }
       return dutyratio;
}
```

130

Bijlage E

Generatorparameters bij stroomverdringing

In tabellen E.1, E.2 en E.3 staan de generatorparameters opgelijst die gebruikt worden bij het gewijzigde generatormodel uit Hoofdstuk 6. De assnelheden $\omega_{\rm m}$ worden verkregen uit eerdere simulaties zonder gewijzigde parameters. Uit deze assnelheid kan de frequentie f van de stromen berekend worden via:

$$f = \frac{N_{\rm p} \cdot \omega_{\rm m}}{2\pi} \tag{E.1}$$

Deze frequentie maakt het mogelijk om de generatorparameters voor de verschillende werkingspunten te bepalen door middel van interpolatie tussen de metingen van de weerstand en inductantie bij variërende frequentie (zie Hoofdstuk 6). De verkregen parameters worden gebruikt in het gewijzigde simulatiemodel.

v [m/s]	$\omega_{\rm m} [{\rm rad/s}]$	f [Hz]	$R_{\rm s} \left[\Omega\right]$	$L_{\rm d} \ [{\rm mH}]$	$L_{\rm q} [{\rm mH}]$
4,0	25,0490	31,8934	237,8861	104,0829	12,7529
4,5	28,8749	36,7647	247,8695	$103,\!9581$	$12,\!9057$
5,0	32,7506	41,6993	253,0973	103,8317	$13,\!0742$
5,5	$36,\!6589$	$46,\!6755$	255,3682	103,7042	$13,\!2782$
6,0	40,5890	$51,\!6795$	256,9506	$103,\!5760$	$13,\!5205$
6,5	44,5355	56,7044	259,7458	103,4472	13,7805
7,0	48,4946	61,7453	264,4312	103,3181	14,0832

Tabel E.1: Gewijzigde generatorparameters bij $R = 1000 \Omega$.

v [m/s]	$\omega_{\rm m} \ [rad/s]$	f [Hz]	$R_{\rm s} \left[\Omega\right]$	$L_{\rm d} \ [{\rm mH}]$	$L_{\rm q} [{\rm mH}]$
4,0	21,4238	$27,\!2776$	223,1804	104,2011	$12,\!6503$
4,5	$25,\!1469$	$32,\!0180$	238,2115	$104,\!0797$	12,7566
5,0	28,9217	$36,\!8242$	$247,\!9587$	$103,\!9566$	$12,\!9076$
5,5	32,7311	$41,\!6745$	$253,\!0803$	$103,\!8323$	$13,\!0733$
6,0	$36,\!5674$	46,5590	$255,\!3318$	103,7072	$13,\!2729$
6,5	40,4251	$51,\!4709$	$256,\!8708$	$103,\!5813$	13,5099
7,0	44,3022	$56,\!4073$	$259,\!5267$	$103,\!4548$	13,7648
7,5	48,1963	$61,\!3655$	264,0288	103,3278	$14,\!0559$
8,0	52,1044	66,3414	269,1963	103,2003	$14,\!5743$

Tabel E.2: Gewijzigde generatorparameters bij $R = 600 \Omega$.

				-	
v [m/s]	$\omega_{\rm m} [{\rm rad/s}]$	f [Hz]	$R_{\rm s} \left[\Omega\right]$	$L_{\rm d} \ [{\rm mH}]$	$L_{\rm q} [{\rm mH}]$
6,0	27,9106	$35,\!5369$	245,8627	$103,\!9895$	$12,\!8663$
6,5	31,8030	40,4928	252,1790	103,8626	$13,\!0307$
7,0	35,6512	45,3925	254,9410	103,7370	13,2216
7,5	39,4860	50,2752	256,4514	103,6120	13,4499
8,0	43,3208	$55,\!1578$	258,6836	103,4869	$13,\!6993$
8,5	47,1692	60,0577	262,6883	103,3613	13,9698
9,0	51,0278	64,9707	267,8745	103,2355	14,3856
9,5	54,9062	69,9088	271,2562	103,1089	$15,\!3809$

Tabel E.3: Gewijzigde generator parameters bij $R=300\,\Omega.$
Bibliografie

- [1] UCTE, "Final report: System disturbance on 4 november 2006," 2007. https://www.entsoe.eu.
- [2] J. G. Slootweg, S. W. H. de Haan, H. Polinder, and W. L. Kling, "General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 144–151, 2003.
- [3] Z. Chen, J. M. Guerrero, and F. Blaabjerg, "A review of the state of the art of power electronics for wind turbines," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 8, pp. 1859–1875, 2009.
- [4] S. Soter and R. Wegener, "Development of induction machines in wind power technologie," Electric Machines & Drives Conference, pp. 1490–1495, 2007.
- [5] A. D. Hansen, F. Iov, F. Blaabjerg, and L. H. Hansen, "Review of contemporary wind turbine concepts and their market penetration," *Wind Engineering*, vol. 28, no. 3, pp. 247– 263, 2004.
- [6] H. Polinder, "Overview of and trends in wind turbine generator systems," Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE, pp. 1–8, 2011.
- [7] L. Vandevelde, "Elektrische energienetten," 2009-2010.
- [8] T.-H. Yeh and L. Wang, "A study on generator capacity for wind turbines under various tower heights and rated wind speeds using weibull distribution," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 2, pp. 592–602, 2008.
- [9] J. L. Acosta, K. Combe, S. Z. Djokic, and I. Hernando-Gil, "Performance assessment of micro and small-scale wind turbines in urban areas," *IEEE Systems Journal*, pp. 1–12, 2011.
- [10] C. Eisenhut, F. Krug, C. Schram, and B. Klöckl, "Wind-turbine model for system simulations near cut-in wind speed," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 414–420, 2007.
- [11] O. Wasynczuk, D. T. Man, and J. P. Sullivan, "Dynamic behavior of a class of wind turbine generators during random wind fluctuations," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no. 6, pp. 2837–2845, 1981.
- [12] B. Neammanee, S. Sirisumrannukul, and S. Chatratana, "Development of a wind turbine simulator for wind generator testing," *International Energy Journal*, vol. 8, pp. 21–28, 2007.

- [13] C. Nichita, D. Luca, B. Dakyo, and E. Ceanga, "Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 17, no. 4, pp. 523–529, 2002.
- [14] H. Polinder, F. F. A. Van der Pijl, G.-J. de Vilder, and P. J. Tavner, "Comparison of directdrive and geared generator concepts for wind turbines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 3, pp. 725–733, 2006.
- [15] L.-F. Pak and V. Dinavahi, "Real-time simulation of a wind energy system based on the doubly-fed induction generator," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 1301–1309, 2009.
- [16] L. Mihet-Popa, F. Blaabjerg, and I. Boldea, "Wind turbine generator modeling and simulation where rotational speed is the controlled variable," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 1, pp. 3–10, 2004.
- [17] J. G. Slootweg, H. Polinder, and W. L. Kling, "Representing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 18, no. 4, pp. 516–524, 2003.
- [18] Y. Lei, A. Mullane, G. Lightbody, and R. Yacamimi, "Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 1, pp. 257–264, 2006.
- [19] E. S. Abdin and W. Xu, "Control design and dynamic performance analysis of a wind turbine-induction generator unit," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 1, pp. 228–236, 2000.
- [20] S. M. Barakati, M. Kazerani, and J. D. Aplevich, "Maximum power tracking control for a wind turbine system including a matrix converter," *IEEE Transactions on Energy Conver*sion, vol. 24, no. 3, pp. 705–713, 2009.
- [21] A. Murdoch, J. R. Winkelman, S. H. Javid, and R. S. Barton, "Control design and performance analysis of a 6 mw wind turbine-generator," *IEEE Transactions on Power Apparatus* and Systems, pp. 1340–1347, 1983.
- [22] J. Morren, J. Pierik, and S. W. H. de Haan, "Inertial response of variable speed wind turbines," *Electric Power Systems Research*, vol. 76, pp. 980–987, 2006.
- [23] T. Thiringer and J.-A. Dahlberg, "Periodic pulsations from a three-bladed wind turbine," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 16, no. 2, pp. 128–133, 2001.
- [24] D. S. L. Dolan and P. W. Lehn, "Real-time wind turbine emulator suitable for power quality and dynamic control studies," *International Conference on Power Systems Transients*, no. IPST05-074, pp. 1–6, 2005.
- [25] D. S. L. Dolan and P. W. Lehn, "Simulation model of wind turbine 3p torque oscillation due to wind shear and tower shadow," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 3, pp. 717–724, 2006.
- [26] T. Petru and T. Thiringer, "Modeling of wind turbines for power system studies," IEEE Transactions on Power System, vol. 17, no. 4, pp. 1132–1138, 2002.
- [27] J. Melkebeek, "Dynamica van elektrische machines en aandrijvingen," 2011-2012.

- [28] G. Dajaku and D. Gerling, "The correct analytical expression for the phase inductance of salient pole machines," *Electric Machines & Drives Conference, 2007 IEMDC '07. IEEE*, vol. 2, pp. 992–996, 2007.
- [29] G. Dajaku and D. Gerling, "The characteristics of the total phase inductance and the angel gamma for salient pole synchronous machines," *Electrical Machines and Systems*, 2007. *ICEMS. International Conference*, pp. 719–722, 2007.
- [30] P. C. Krause, O. Wasynczuk, and S. D. Sudhoff, Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. 605, Third Avenue, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2 ed., 2002.
- [31] T. Bräunl, Embedded Robotics Mobile Robot Design and Application with Embedded Systems. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 3 ed., 2008.
- [32] J. Melkebeek, "Elektrische aandrijftechniek," 2009-2010.
- [33] J. Melkebeek, "Gestuurde elektrische aandrijvingen," 2010-2011.
- [34] J. Van de Vyver, J. D. M. De Kooning, B. Meersman, T. L. Vandoorn, and L. Vandevelde, "Turbine inertia and gearbox compensation in a lab-scale emulator for small windturbines," *International Energy Conference and Exhibition (EngeryCon 2012), Firenze*, 2012.
- [35] J. Melkebeek and L. Vandevelde, "Bouw en berekening van elektrische machines," 2011-2012.
- [36] A. Van den Bossche, "Technologie van elektrische installaties," 2011-2012.
- [37] W. Hu, Z. Chen, Y. Wang, and Z. Wang, "Flicker mitigation by active power control of variable-speed wind turbines with full-scale back-to-back power converters," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 3, pp. 640–649, 2009.
- [38] T. Sun, Z. Chen, and F. Blaabjerg, "Flicker study on variable speed wind turbines with doubly fed induction generators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 896–905, 2005.
- [39] C. Vilar, J. Usaola, and H. Amaris, "A frequency domain approach to wind turbines for flicker analysis," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 18, no. 2, pp. 335–341, 2003.
- [40] T. Thiringer, T. Petru, and S. Lundberg, "Flicker contribution from wind turbine installations," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no. 1, pp. 157–163, 2004.
- [41] A. Van Calster, "Elektronische systemen en instrumentatie," 2010-2011.
- [42] P. Fraba, "Application note: Implementation of ssi master interface," 2009. http://www.posital.sg/sg/products/POSITAL/AbsoluteEncoders_Context/ AbsoluteEncoders_Context_Technology_SSI_AppNote.pdf.
- [43] A. Van Calster, "Industriële elektrische metingen," 2010-2011.